



DOUTORAMENTO
EM
SEGURANÇA E SAÚDE
OCUPACIONAIS

Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor
Segurança e Saúde Ocupacionais
Universidade do Porto

**Ambiente Térmico em Espaços não
Climatizados e a sua Influência na
Produtividade e Sinistralidade Laboral:
Uma Aplicação ao Sector Mineiro**

António Manuel Coelho Oliveira e Sousa

Orientador: Professor Doutor João Manuel Abreu dos Santos Baptista (FEUP)

Coorientador: Professor Doutor Abílio Augusto Tinoco Cavalheiro (FEUP)

2013



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL

VoIP/SIP: feup@fe.up.pt ISN: 3599*654
Telephone: +351 22 508 14 00 Fax: +351 22 508 14 40
URL: <http://www.fe.up.pt> Correio Electrónico: feup@fe.up.pt

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, em especial à minha mulher, Filomena, e aos meus filhos, Joana e João, pelo incentivo, suporte e compreensão, em todos os momentos.

Um agradecimento muito especial ao Professor Doutor João Santos Baptista que, na qualidade de orientador deste trabalho, sempre me motivou, apoiou e acompanhou em todas as vertentes do seu desenvolvimento, com uma disponibilidade inexcedível. Pelas suas qualidades técnico-científicas e humanas, sinto-me lisonjeado e imensamente grato por ter sido por ele supervisionado.

Ao Professor Doutor Abílio Cavalheiro, coorientador deste trabalho, pela revisão deste texto e pelo desenvolvimento e construção de equipamentos eletrónicos de medição de parâmetros ambientais.

À Universidade do Porto, ao Professor Doutor Barbedo de Magalhães e à Professora Doutora Olívia Pinho - respetivamente, diretor inicial e diretora atual do programa doutoral onde se insere esta tese - pela promoção e coordenação de uma formação avançada inédita no país, na área da segurança e saúde ocupacionais (DemSSO).

Ao Professor Manuel Carlos Nunes, diretor do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia (ISE) da Universidade do Algarve (UAlg), onde sou docente, por me ter proporcionado condições organizativas e de afetação de tempo que facilitaram a execução deste trabalho.

Ao Laboratório de Prevenção de Riscos Ocupacionais e Ambientais (PROA) e ao Laboratório de Biomecânica da Universidade do Porto (LABIOME) por toda a colaboração.

À equipa do secretariado do DemSSO, em especial à Engenheira Célia Ferreira, pelo apoio incondicional na resolução de todos os aspetos administrativos e funcionais.

A todos os colegas do DEM e do DemSSO pelo apoio que, de forma direta ou indireta, me prestaram para a concretização desta tese.

RESUMO

O ambiente térmico dos locais de trabalho é um fator condicionador da realização das diferentes atividades laborais. Em termos qualitativos, é amplamente reconhecida a influência do ambiente térmico nos planos de produtividade e de segurança ocupacionais. A sua importância é acrescida em tarefas ou sectores que possuam características mais agressivas ou exigentes, são destes, exemplo, as condições em que se executam os trabalhos no interior de explorações mineiras subterrâneas onde, usualmente, existem temperaturas e graus de humidade relativa elevados.

A investigação desenvolvida pretendeu relacionar, nos ambientes de trabalho, os valores de temperatura e humidade relativa do ar, com os níveis de produtividade e segurança ocupacionais, através do desenvolvimento de um modelo que quantifica essas relações e respetivos impactes, em duas dimensões: na interação física entre as grandezas e nas suas correspondentes repercussões económicas. Para tal, identificaram-se os instrumentos disponíveis para modificação e controlo do ambiente térmico - aplicados às condições e contexto do setor mineiro – cujos custos de utilização, conjugados com as ‘respostas’ obtidas pela componente relacional do modelo, permitem otimizar as condições de trabalho existentes, o que constitui o objetivo final do trabalho empreendido.

O modelo proposto baseia-se numa abordagem inovadora para tratamento das relações entre as variáveis indicadas - quer quanto à definição e génese das funções relacionais a desenvolver, quer quanto à métrica a utilizar na quantificação dos respetivos efeitos – podendo considerar-se complementar aos trabalhos conhecidos e publicados e um contributo para a evolução do conhecimento sobre o assunto.

A validação “conceptual” do modelo foi feita com sucesso, de forma quantitativa, através da utilização dos intervalos de variação definidos como domínio para cada variável. O desenho do modelo foi orientado no sentido de potenciar a sua versatilidade de aplicação a outros contextos, dentro do mesmo âmbito. A estratégia de construção adotada - assente na agregação das diversas funções parcelares, unívocas – facilita a adaptação a novas realidades, por incorporação, na sua matriz, das ‘condições iniciais’ definidoras de cada situação (laboratorial ou real). Esta característica inédita - fundamental para o processo dinâmico de adaptação evolutiva do modelo – apresenta vantagens comparativas, em relação às formulações globais ‘fechadas’, utilizadas na generalidade dos estudos publicados sobre o tema.

Os resultados dos testes e análises de sensibilidade efetuados permitem concluir pela adequação da estrutura e comportamento de resposta do modelo, face aos objetivos propostos.

Palavras-chave: Ambientes Térmicos Quentes, Stresse Térmico, Minas, Produtividade, Segurança e Saúde Ocupacionais, Modelos Quantitativos

ABSTRACT

The thermal environment in workplaces is a determinant risk factor for the different work activities. In qualitative terms, the influence of the thermal environment on productivity and occupational safety is widely recognized. Its importance is increased in tasks or sectors that have more aggressive or demanding characteristics, such as the workplace conditions in underground mining where temperatures and humidity levels are usually very high.

The research developed seeks to relate the thermal environment conditions (temperature and relative humidity values in the workplace), with the productivity and occupational safety levels, through the development of a model that quantifies those relationships and their respective impacts on two dimensions: the physical interaction between variables and its corresponding economic repercussions. For this purpose, were identified the available tools for modification and control of the thermal environment - applied to the conditions and context of the mining sector - whose running costs, coupled with the 'answers' obtained by the relational component of the model, enables the working conditions optimization, which is the final goal of the undertaken work.

The proposed model is based on an innovative approach in the treatment of relations between the above mentioned variables – either on the definition and genesis of the relational functions developed or by the metric used to quantify its effects – which can be considered complementary to the known published works, as well as a contribution to the evolution of knowledge on the subject.

The "conceptual" validation of the model was done successfully, in a quantitative way, through the use of the defined domain ranges for each variable. The design model was directed to enhancing its versatility of application to other contexts within the same framework. The construction strategy adopted - based on the aggregation of partial and univocal functions - facilitates the adaptation of the model to new realities, by incorporation the 'initial conditions' that define each situation (laboratory or real) inside its matrix. This unique feature - essential for the dynamic process of model evolutionary adaptation – has comparative advantages with the global and 'closed' formulations, used in most published studies on the topic.

The results of the tests and sensitivity analyzes performed, allow concluding of the suitability of the model structure and its behavior, toward the proposed goals.

Keywords: Hot Thermal Environment, Thermal Stress, Mining, Productivity, Occupational Safety and Health, Quantitative Models

ÍNDICE

Preâmbulo.....	1
1. INTRODUÇÃO	3
1.1 Seleção do setor de atividade	3
1.2 Definição do problema a abordar	4
1.3 Justificação da tese	6
1.4 Hipóteses de trabalho.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Estratégias de pesquisa	18
2.2 Pesquisa bibliográfica.....	20
2.2.1 Setor mineiro.....	20
2.2.2 Problemática do ambiente térmico	23
2.2.2.1 Quadro concetual.....	23
2.2.2.2 Efeitos e consequências nos trabalhadores	27
2.2.2.3 Métodos de monitorização e avaliação / Índices.....	34
2.2.2.4 Metodologias e métodos de controlo.....	47
2.2.3 Outros aspetos ambientais	54
2.2.4 Produtividade e segurança ocupacionais	56
3. OBJETIVOS E METODOLOGIAS	73
3.1 Objetivos	73
3.2 Metodologias.....	75
3.2.1 Metodologias/objetivo O1	77
3.2.1.1 Medição do ambiente térmico	77
3.2.1.2 Medição da segurança ocupacional.....	79
3.2.1.3 Medição da produtividade	83
3.2.2 Metodologias/objetivo O2	89
3.2.3 Metodologias/objetivo O3	91
3.2.4 Metodologias/objetivo OG.....	100
4. MODELIZAÇÃO	107
4.1 Variáveis principais	109
4.2 Função objetivo	110
4.3 Custo “energia” (C_e).....	111
4.4 Custo “segurança” (C_s)	112

4.5	Custo “produtividade” (C_p)	114
4.5.1	Custos associados a paragem de ‘produção’ (TFT_p).....	114
4.5.2	Custos associados a diminuição do ritmo de trabalho (DR_p).....	118
4.6	Relação I-WBGT	122
4.7	Relação TFT_s -WBGT.....	125
4.8	Relação TFT_p -WBGT	125
4.8.1.	Relação TFT_{tci} – WBGT	126
4.8.2.	Relação TFT_{WBGT} – WBGT	128
4.9	Relação DR_p - WBGT	130
4.10	Restrições de sinal.....	131
4.11	Modelo global síntese	132
4.11.1.	Modelo ‘Set 0’	133
4.11.2.	Modelo ‘Set 1’	137
5.	LEVANTAMENTO, RECOLHA E TRATAMENTO DE DADOS	143
5.1	Variáveis e constantes	144
5.2	Dados e testes prévios - Set 0_T	146
5.3	Dados e testes prévios - Set 1	151
5.4	Solução e análise de sensibilidade global (<i>Software Lingo</i>) - Set 0_T	156
6.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	163
6.1	Análise de resultados obtidos para o Set 0_T	163
6.2	Análise de resultados obtidos para o Set 1	167
6.3	Análise de sensibilidade e comparação de resultados – Set 0_T	175
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS/CONCLUSÕES.....	189
8.	BIBLIOGRAFIA.....	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução do valor da produção de minérios metálicos (2003-2010)	8
Figura 1.2 – Evolução da produção de minérios metálicos, em quantidade e valor (2007-2010)	9
Figura 1.3 – Evolução do preço do cobre (julho 2010 a janeiro 2011)	11
Figura 1.4 – Hipóteses de trabalho	13
Figura 2.1 – Ambiente térmico e aspetos correlacionados	17
Figura 2.2 - Formas de transferência de calor	26
Figura 2.3 – Relação entre temperaturas e zonas de sensações térmicas	27
Figura 2.4 – Relação entre temperaturas, zonas de sensações térmicas, índices e âmbito do estudo	42
Figura 2.5 - Relação entre os índices PMV e PPD	44
Figura 2.6 – Relação entre temperatura e produtividade	67
Figura 3.1 – Objetivos (O1 a O3 e OG)	74
Figura 3.2 – Estrutura global da investigação	75
Figura 3.3 – Sequência de objetivos/metodologias	76
Figura 3.4 – Ambiente térmico, segurança e produtividade	77
Figura 3.5 – Temperatura equivalente	78
Figura 3.6 – Ajustamento da função segurança / ambiente térmico	81
Figura 3.7 – Relação ambiente térmico / segurança	87
Figura 3.8 – Relação ambiente térmico / produtividade, devido a paragem de trabalho	88
Figura 3.9 – Relação ambiente térmico / produtividade, devido a diminuição do ritmo de trabalho	88
Figura 3.10 – Relação ventilação / ambiente térmico (micro e macro)	89
Figura 3.11 – ‘Puzzle’ organizacional	93
Figura 3.12 – Relação produção, produtividade e número trabalhadores	94
Figura 3.13 – Temperatura de referência para a equipa de trabalho	95
Figura 3.14 – Componentes do modelo	103
Figura 4.1 – Parâmetros físicos e económicos do modelo	107
Figura 4.2 – Estrutura global do modelo	108
Figura 4.3 – Sequência de passos na apresentação detalhada do modelo	109
Figura 4.4 – Limites de temperatura corporal interna	115

Figura 4.5 – TCI padrão	120
Figura 4.6 – Função I-WBGT inicial	124
Figura 4.7 – Tempo de ensaio - WBGT	126
Figura 4.8 – Relação TFT_{wbgt} – WBGT	129
Figura 4.9 – Relação velocidade do ergómetro – WBGT	130
Figura 4.10 – Estrutura de formulação de um problema a otimizar	135
Figura 5.1 – Sequência de cálculo para <i>Set 0_T</i>	147
Figura 5.2 – Sequência de cálculo para <i>Set 1</i>	151
Figura 5.3 – <i>Set 1</i> - Intervalos de temperaturas (WBGT, T_a e zona de cálculo de custos)	153
Figura 5.4 – Expressões do <i>Set 0_T</i> introduzidas no <i>software Lingo</i>	157
Figura 5.5 – <i>Lingo Solver Status</i>	158
Figura 5.6 – <i>Lingo Solution Report</i>	159
Figura 5.7 – <i>Lingo Range Report</i>	161
Figura 6.1 – Resultados globais para <i>Set 0_T</i>	163
Figura 6.2 – Incremento dos custos de energia em 5x (Variante A)	165
Figura 6.3 – Incremento dos custos de energia em 10x (Variante A)	165
Figura 6.4 – Inversão do fator preponderante no cálculo de TFT_p (Variante B)	166
Figura 6.5 – Variantes A (5x) e B, conjugadas	166
Figura 6.6 – Variantes A (10x) e B, conjugadas	166
Figura 6.7 – Resposta do modelo de Koehn e Brown	167
Figura 6.8 – Modelo Koehn e Brown. Exemplo relação $H_r - P$	169
Figura 6.9 – Diagrama síntese do processo de desenvolvimento, validação e aplicação dos modelos	174
Figura 6.10 – Solução ótima de um problema de minimização	182
Figura 6.11 – Solução para declive da FO nulo ($m = 0$)	183
Figura 6.12 – Solução para declive máximo admissível da FO ($m =$ declive da restrição 6)	184

ÍNDICE DE QUADROS/TABELAS

Quadro 2.1 – Exemplo de resultados de pesquisa	18
Quadro 2.2 – Exemplo de refinamento da pesquisa (em profundidade)	18
Quadro 2.3 – Estratégias de refinamento da pesquisa	19
Quadro 2.4 – Consequências do stresse térmico	29
Quadro 2.5 – Normas e índices de ambiente térmico	40
Quadro 3.1 – Ambiente térmico (variáveis, índice e métricas)	79
Quadro 3.2 – Segurança ocupacional (variáveis, índice e métricas)	83
Quadro 3.3 – Produtividade – Contexto mineiro real (variáveis, índice e métricas)..	85
Quadro 3.4 – Produtividade – Contexto experimental (variáveis, índice e métricas)	86
Quadro 3.5 – Síntese de unidades finais	91
Quadro 4.1 – Exemplo de valores para determinação da temperatura de referência WBGT	117
Quadro 4.2 – Temperaturas de referência WBGT, para o exemplo	117
Quadro 4.3 – Temperaturas de referência WBGT e TFT, para $Ar_{sensível} = \text{Não}$, Aclimat = Sim, CM = 3	129
Quadro 4.4 – Set 0	133
Quadro 4.5 – Equações dos Set 0_T e Set 0_P	136
Quadro 4.6 – Set 1	140
Quadro 5.1 – Variáveis do modelo	145
Quadro 5.2 – Constantes do modelo	145
Quadro 5.3 – Resultados globais para Set 0_T	148
Quadro 5.4 – Resultados globais para Set 0_T – Variante A (custo energia 5x e 10x superior)	149
Quadro 5.5 – Resultados globais para Set 0_T – Variante B ($TFT_p = \text{Min} [TFT_{tci},$ $TFT_{wbgt}]$)	149
Quadro 5.6 – Resultados globais para Set 0_T – Conjugação das Variantes A (custo energia 5x e 10x superior) e B ($TFT_p = \text{Min} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$)....	150
Quadro 5.7 – Resultados obtidos para o modelo de Koehn e Brown, para diferentes valores de T_a e H_r	154
Quadro 5.8 – Custos de energia e quebra de produtividade obtidos para o Set 1	155
Quadro 5.9 – Custos totais obtidos para o Set 1	155

Quadro 6.1 – Excerto da ‘Table 6’, em Koehn e Brown (1985)	171
Quadro 6.2 – Comparação de resultados <i>Set 0_T</i> – <i>Excel</i> versus <i>Lingo</i>	175
Quadro 6.3 – Comparação de resultados <i>Set 0_T</i> (variantes A e B) – <i>Excel</i> versus <i>Lingo</i>	176
Quadro 6.4 – Conversão de valores aproximados da figura 5.6 nos seus correspondentes valores reais	178
Quadro 6.5 – Excertos de dados relativos à solução da variante A10B	180
Quadro 6.6 – Variação de coeficientes da função objetivo (fig. 5.7)	182
Quadro 6.7 – Excerto de dados RHS (fig. 5.7)	185

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC – Ar Condicionado

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ACLP - Annual Cost of Lost Production

ACLW - Annual Cost of Lost Workdays

ACM - Association of Computing Machinery

ACMV - Air Conditioning Mechanic Ventilation

ACP - Air Cooling Power

ACS - American Chemical Society Publications

AIQA – Acidentes, Incidentes e Quase-Acidentes

ARA – Aparelho de Respiração Autónoma

ARIEM - Army Research Institute of Environmental Medicine

ASCE - American Society of Civil Engineers

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AT – Acidente de trabalho

BMI – Body Mass Index

CAE – Classificação Portuguesa das Atividades Económicas

CE Database - Civil Engineering Database

CM - Classe de Taxa Metabólica

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

DCAUSP – Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

DemSSO – Doutorado em Segurança e Saúde Ocupacionais

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

DR – Diminuição de Ritmo

EMP - Enterprise Mine Project

EMR - Experience Modification Rate

EMS – Equipment Management System (Sistema de Gestão de Equipamentos)

EN – Norma Europeia

EPI - Equipamento de Proteção Individual

ERIC - Educational Resources Information Center

ESRU - Energy Systems Research Unit

ET - Equivalent Temperature Index

EUA – Estados Unidos da América

F – Frequência

FO – Função Objetivo

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

G – Gravidade

HSDA - Health Services and Development Agency

HSI – Índice de Stresse por Calor

IChemE - Institute of Chemical Engineers

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMC - Índice de Massa Corporal

IOP - Institute of Physics

IREQ – Índice de Isolamento Requerido de Vestuário

ISO – International Organization for Standardization

ITS – Índice de Stresse Térmico ou Taxa Requerida de Suor

LABIOMEPE - Laboratório de Biomecânica da Universidade do Porto

MCA - Minerals Council of Australian

MDI - Índice de Desconforto Modificado

MS – Massa salarial

MSHA - Mine Safety and Health Administration

NLP – NonLinear Problem

NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health

NO_x – Óxidos de Azoto

NO - Óxido nítrico

N₂O - Óxido nitroso

OCR - Objective Coefficient Ranges

OEE – Overall Equipment Effectiveness

OIT – Organização Internacional do Trabalho

P4SR – Taxa de Suor Estimada para 4 Horas

PIB – Produto Interno Bruto

PME – Pequenas e Médias Empresas

PMV - Predicted Mean Vote

PPC - Plano e Controlo de Produção

PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied

PROA - Laboratório de Prevenção de Riscos Ocupacionais e Ambientais

PT – Postos de Trabalho

R – Risco

RC – Ritmo Cardíaco

RHS – Right Hand Side

RSI - Índice Relativo de Tensão

SCIE - Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SCP - Specific Cooling Power Index
SDI - Serviços de Documentação e Informação
SHST – Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho
SIAM - Society for Industrial Applied Mathematics
SO₂ - Dióxido de enxofre
SRT - Synthesis-Reduced Temperature
SSO – Segurança e Saúde Ocupacionais
SV – Sistema de ventilação
SVPG - Sistema de ventilação principal global
SVSL - Sistema de ventilação secundário localizado
SWreq - Taxa Requerida de Suor
TAR – Relação de Aceitação Térmica
TCI – Temperatura Corporal Interna
TFP – Total Factor Productivity
TFT – Tempo Fora da Tarefa
TLV - Threshold Limit Values
TQM - Total Quality Management
TSI – Índice de Tensão Térmica
TWL - Thermal Work Limit
UAE - United Arab Emirates
U.M. – Unidade Monetária
VLE – Valor Limite de Exposição
WBGT - Wet Bulb Globe Temperature

PREÂMBULO

As temáticas de Segurança, Higiene e Saúde (SHST) em ambiente laboral têm sido objeto de crescente atenção nos últimos tempos. Tal situação decorre, por um lado, da evolução do quadro legal vigente e, por outro, das novas exigências pessoais e sociais inerentes a uma população globalmente mais informada e esclarecida. Nesse contexto, as empresas são impulsionadas no sentido de adotarem medidas e procedimentos que conduzam à melhoria contínua das suas condições de operação, incorporando inovações tecnológicas, adotando boas práticas funcionais, de gestão e de organização do trabalho.

No entanto, a visão - algo redutora - focada apenas nas condições de trabalho e respetivas consequências nos trabalhadores, tem vindo a evoluir para uma nova dimensão, mais global, em que o conceito “trabalho” é substituído pelo conceito “ocupacional”. Este último engloba qualquer atividade desenvolvida pelo indivíduo, que possa interferir com a sua segurança ou saúde, independentemente do tipo de vínculo que lhe está subjacente. Esta nova abordagem centra o problema e a sua análise na atividade humana, em si mesma, notando que as consequências das condições de segurança e saúde afetam o indivíduo (uno e indiviso), independentemente da génese da atividade (trabalho, lazer, doméstica,...) que está na sua origem.

Considerando a extensão conceptual referida e como resultado das lacunas de investigação técnico-científica identificadas nesta área emergente, surge uma oferta formativa pioneira e única em Portugal, nesta área de conhecimento. Trata-se da primeira edição do programa de doutoramento em “Segurança e Saúde Ocupacionais (SSO)”, cujo início de funcionamento ocorreu no último terço de 2010 e no qual se insere o presente trabalho.

O surgimento do referido programa doutoral alicerça-se em três aspetos cruciais e relevantes: *atualidade*, *necessidade* e *utilidade*.

Atualidade, por ser um programa pioneiro na promoção de investigação de temas relacionados com a segurança e saúde ocupacionais, cuja evolução tem sido crescente e acelerada, desde a integração de Portugal no espaço comunitário europeu, não se encontrando, ainda, suficientemente estudada.

Necessidade, pelas razões anteriormente apontadas e que se consubstanciam na limitada quantidade de trabalhos técnico-científicos produzidos nesta área, pela comunidade académica nacional.

Utilidade, pela aplicabilidade dos estudos no plano empresarial, com reflexo direto na melhoria do desempenho e qualidade de vida das pessoas e da sociedade em geral.

A integração destes aspetos - *atualidade*, *necessidade* e *utilidade* - justificam a realização de um programa doutoral nesse âmbito e a correspondente aplicação de recursos para o desenvolvimento de estudos sobre a temática em causa, com o objetivo de contribuir para alterar a realidade nacional, rumo a um estágio de desenvolvimento superior.

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório pretende-se expor as razões que fundamentaram a escolha do tipo de problemática a abordar, bem como do setor de atividade onde irá incidir o desenvolvimento do presente trabalho.

Para tal, numa apresentação separada por pontos, caracteriza-se o setor de atividade e delimita-se o problema a tratar - com base nos dados disponíveis, quanto às suas dimensões e relevâncias socioeconómicas - o que culmina na justificação do interesse da realização desta tese e no estabelecimento das hipóteses de trabalho a ponderar.

Após delineação desse quadro referencial e justificativo prévio, finaliza-se o capítulo com a exposição da estrutura de apresentação do presente documento, enumerando-se os capítulos que o constituem, bem como uma breve referência aos conteúdos que cada um deles encerra.

1.1 Seleção do setor de atividade

Em consonância com a filosofia do programa de doutoramento em segurança e saúde ocupacionais em que se insere o presente trabalho, uma das finalidades a atingir com os estudos a desenvolver será o contributo, efetivo e concreto, para a melhoria da realidade atual e futura. Tais estudos deverão incidir sobre o desempenho, segurança e saúde ocupacionais, no sentido de promover a maximização da *qualidade de vida global da população*.

Todas as contribuições que possam concorrer para alcançar esses objetivos são desejáveis, sendo, no entanto, de considerar prioritários os que se dirijam a aspetos, atividades, processos e setores com maior incidência de ‘problemas’ - quer em número de ocorrências (frequência (F)), quer na extensão das suas consequências (gravidade (G)) – de modo a potenciar a eficácia da aplicação dos recursos disponíveis.

Neste contexto, a Indústria Extrativa – que inclui as explorações mineiras subterrâneas como um dos seus subsectores – apresenta, em Portugal, índices globais de sinistralidade bastante elevados (ver ponto 1.3), tornando-a, por isso, num setor preferencial de estudo.

Complementarmente, é uma atividade com grande dimensão socioeconómica e disseminação geográfica mundial (ver ponto 1.3), o que possibilitará a aplicação dos resultados a um número relevante de membros da população (que interagem ou são afetados pela atividade do setor) e a um espaço geográfico global, transnacional.

Nesse sentido, a sua seleção reúne as condições prévias para que os resultados possam atingir o impacto e abrangência desejáveis, potenciando favoravelmente a relação custo/benefício do estudo.

A conjugação dos aspetos referidos fundamenta a opção de desenvolver investigação aplicada ao contexto das atividades e ambientes típicos do setor mineiro, considerando-se

que este se reveste de importância necessária e suficiente para a prossecução das finalidades e objetivos propostos, enquanto alvo de estudo.

1.2 Definição do problema a abordar

Das considerações anteriores resulta a delimitação do contexto em que o estudo se irá focar, designadamente, as condições de trabalho das explorações mineiras subterrâneas. Dentro destas, os problemas de segurança e saúde que se colocam são de vária ordem, com maiores ou menores especificidades, incidências ou consequências. A exemplificação dessa diversidade será apresentada no capítulo 2, através da referência a diversas abordagens e trabalhos identificados no decurso da revisão bibliográfica efetuada.

Face à vasta panóplia de temas e aspetos relacionados com a produtividade, segurança e saúde ocupacionais, associados à atividade mineira subterrânea, não é viável tratá-los, conjunta e simultaneamente, com os recursos existentes, quer pela dimensão e multidisciplinaridade que a problemática encerra, quer pelo tempo útil disponível para a execução do presente estudo.

Nesse sentido, há que identificar e delimitar um problema integrado nessas áreas/setor de atividade, que reúna o seguinte conjunto de atributos:

- Problema ‘em aberto’ ou que necessite de uma nova abordagem no seu tratamento;
- Interesse e atualidade do assunto a abordar;
- Aplicabilidade prática;

e cujo tratamento seja agilizável com os recursos humanos, materiais e temporais disponíveis.

De entre os diversos tipos de problemas existentes, o ambiente térmico no interior de minas é um fator de risco com múltiplas incidências no ser humano e na atividade, que se considera reunir os requisitos acima enunciados. Esta ideia será corroborada e consolidada pela pesquisa bibliográfica realizada e apresentada no capítulo 2.

Condições extremas de calor e humidade são causa de diminuição de capacidades físicas e cognitivas e do surgimento de doenças, ou mesmo de morte, afetando negativamente as condições de segurança e produtividade dos trabalhadores.

Sobre ambiente térmico, inúmeros estudos estão publicados (ver cap. 2), versando áreas tão distintas como sejam, por exemplo:

- Aspetos conceptuais (variáveis, modelos);
- Balanço térmico (termodinâmica, transmissão de calor);
- Efeitos nos trabalhadores (saúde, segurança, produtividade);
- Métodos (medição e monitorização das grandezas relevantes);
- Sistemas de ventilação (controlo térmico e ambiental);
- Índices (conforto, desconforto, stresse térmico);

entre outras.

Vislumbra-se, no entanto, ‘existir espaço’ para o estudo quantitativo que se propõe e que, em concreto, seguidamente se descreve:

Genericamente, o problema a tratar poderá definir-se como “a quantificação do efeito das condições de ambiente térmico na segurança e produtividade dos trabalhadores, durante a realização das suas tarefas, em espaços de características quentes e húmidas, não climatizados”.

A relação qualitativa entre o aumento de temperatura e humidade do ar e a consequente diminuição de segurança e produtividade nas atividades mineiras é consensual e amplamente difundida.

É também de salientar que o controlo das condições ambientais (temperatura e humidade inclusive) é realizado, no interior de minas, apenas através do sistema de ventilação instalado. Assim, se nas frentes de trabalho os valores de temperatura e humidade são elevados, reduzindo a segurança e produtividade dos trabalhadores, é necessário aumentar a quantidade de ar que lhes é fornecida através do sistema de ventilação, para repor as condições adequadas. O aumento dos proveitos (i.e., a melhoria de produtividade), conseguido por esta via, tem como contraponto o aumento de custos de energia, associados ao incremento dos fluxos de ar fornecidos pelo sistema de ventilação.

A apreciação de todos estes aspetos conduz-nos à definição de um novo problema, de maior dimensão e complexidade, distinto do inicialmente formulado, que pode ser descrito como a integração dos seguintes problemas parcelares:

- P1: Quantificar os efeitos conhecidos entre as grandezas: ambiente térmico, segurança e produtividade;
- P2: Quantificar o efeito das condições de ventilação nas variáveis térmicas (temperatura, humidade), nos locais de estudo;
- P3: Valorar os efeitos contabilizados em P1 e P2, em unidades monetárias (u.m.);
- P4: Estabelecer um modelo que permita avaliar a relação custo/benefício entre alterações das condições de ventilação (custos, em unidades monetárias) e as correspondentes variações induzidas na produtividade (proveitos, em unidades monetárias).

O problema global que se pretende estudar, aplicado ao contexto do setor mineiro, consiste na integração dos quatro componentes mencionados (P1 a P4), considerando salvaguardadas as condições ambientais mínimas, que garantam a manutenção do adequado estado de saúde dos trabalhadores.

A sua resolução encerra os desafios de, por um lado, traduzir quantitativamente as relações qualitativas conhecidas (entre as grandezas ambiente térmico-segurança-produtividade) e, por outro, obter uma formulação para o balanço entre os custos associados ao consumo de energia para melhorar o ambiente térmico e os proveitos, induzidos por essa melhoria ambiental, em termos de segurança e produtividade.

Esta abordagem, que se considera inovadora e por explorar, permitirá desenvolver um instrumento de aplicação prática, que possibilitará minimizar os custos operacionais, através da tomada de decisões racionais quanto ao controlo das variáveis em estudo, baseadas num balanço técnico-económico de custos/benefícios. A tradução da análise e resultados, em unidades monetárias, contribuirá para melhorar a perceção da dimensão e

impacte económico do problema, bem como o diálogo e comunicação entre todos os interlocutores interessados e envolvidos na análise e resolução deste tipo de matérias.

1.3 Justificação da tese

Neste ponto pretende-se dar evidência aos aspetos que fundamentam e motivam o estudo que se pretende ‘levar a cabo’. Para concretizar esse objetivo, descreve-se a realidade da problemática da segurança e produtividade na indústria extrativa, nacional e internacional. Será também referida a dimensão e perspetivas de crescimento do setor, culminando na identificação dos novos desafios que se colocam, no âmbito da problemática que se pretende investigar.

Para a análise da situação atual no sector, no plano nacional, recorreu-se aos dados estatísticos oficiais disponíveis¹, onde se refere, relativamente a Portugal Continental para o ano de 2009, que “a taxa de incidência² do total de acidentes era superior nas secções E³ (Captação, tratamento e distribuição de água; saneamento, gestão de resíduos e despoluição) e B⁴ (Indústrias extrativas) onde existiram cerca de 98 e 93 acidentes de trabalho por cada 1000 trabalhadores, respetivamente.”.

Para o mesmo período temporal e espaço geográfico, é indicado na mesma fonte: “Considerando apenas os acidentes mortais, as taxas mais elevadas encontravam-se nas secções B (Indústrias extrativas) e E (Captação, tratamento e distribuição de água; saneamento, gestão de resíduos e despoluição) onde ocorreram, cerca de 71 e 48 acidentes de trabalho mortais, respetivamente, por cada 10 000 trabalhadores.”

Resulta da informação anterior que o Sector B (Indústrias extrativas) lidera, pela negativa, quer se considere o número de ocorrências (2º lugar) ou o número de acidentes mortais (1º lugar), justificando uma atenção especial nesta matéria.

A comparação internacional, com a realidade de outros países desenvolvidos - como sejam, por exemplo, os Estados Unidos da América (EUA) ou a Nova Zelândia – não pode ser feita de modo direto, visto que os indicadores e a classificação de setores de atividade não coincidem com a usada internamente.

Em todo o caso, considerando o posicionamento relativo entre o sector mineiro e a restante atividade económica, nesses países, constata-se que, em 2009, nos EUA, a taxa de incidência⁵ de acidentes e doenças, não mortais, relativos à extração mineira foi de 1,5,

¹ “Estatísticas da Atividade do Serviço de Segurança e Saúde no Trabalho.” 2010. <http://www.gep.mtss.gov.pt/estatistica/condicoes/shst09.pdf>, acedido em 12 de outubro de 2010.

² Taxa de incidência = Número acidentes de trabalho / Número de trabalhadores x 1000;

³ Secção definida no CAE-Rev.3;

⁴ Secção definida no CAE-Rev.3;

⁵ A taxa de incidência é calculada do seguinte modo:

“The incidence rates represent the number of injuries and illnesses per 100 full-time workers and were calculated as: $(N/EH) \times 200,000$, where

N = number of injuries and illnesses

EH = total hours worked by all employees during the calendar year

enquanto a média para todas as indústrias - onde se inclui o estado e a administração local - se cifrou em 1,9⁶. O número de acidentes mortais ocorridos, no mesmo período, sector e território foi de 102, correspondendo a 2,4% do total global (4.340 registados)⁷.

Também para a Nova Zelândia, a informação disponível⁸ - que reporta ao ano de 2003 - indica a ocorrência de 29 acidentes graves no sector, que emprega 3.316 pessoas, a que corresponde uma taxa de incidência de 0,87%⁹.

Como se referiu, não existindo normalização no tratamento dos dados estatísticos, em termos internacionais, os mesmos não são diretamente comparáveis. No entanto, observa-se que os índices nos países referidos são, em termos relativos (internos e externos), muito melhores que os de Portugal, o que nos permite afirmar que há um amplo 'espaço de manobra' na melhoria das condições de segurança e saúde ocupacionais nesse sector industrial, no esforço de aproximação e convergência aos indicadores daqueles países, melhor posicionados. Esta ilação corrobora as considerações anteriormente efetuadas, baseadas na análise dos dados estatísticos nacionais.

No plano da sinistralidade laboral, a indústria extrativa nacional - que engloba as explorações subterrâneas e à superfície, de acordo com a Classificação Portuguesa das Atividades Económicas, (CAE-Rev.3 2007)¹⁰ - apresenta, segundo os dados disponíveis, taxas de acidentes (incidência e gravidade) bastante negativas, quer na comparação com outros setores de atividade, no plano interno, quer por comparação com os valores do mesmo setor, no plano internacional (EUA e Nova Zelândia). Este será um primeiro aspeto que justifica, desde logo, a realização de estudos que possam contribuir para a melhoria da situação.

Quanto ao peso económico da indústria extrativa nacional, a produção deste setor de atividade, em 2010, ascendeu a 1.276 milhões de euros, segundo dados da Direção Geral de Energia e Geologia¹¹ (DGEG, 2011), o que corresponde, aproximadamente, a 0.74% do PIB¹² desse ano.

De acordo com a mesma fonte, a parcela que corresponde à produção de minérios metálicos é de 427,6 milhões de euros (0.25% PIB), valor relativo à comercialização de 324.031 toneladas de minério extraído nas 56 minas com atividade produtiva declarada no período, as quais se encontravam distribuídas, geograficamente, por 16 dos 18 distritos do território nacional (exceto Évora e Portalegre).

200,000 = base for 100 equivalent full-time workers (working 40 hours per week, 50 weeks per year).

⁶ Bureau of Labor Statistics. 2010a. United States Department of Labor. http://www.bls.gov/news.release/archives/osh_10212010.pdf, acedido em 15 de novembro de 2010.

⁷ Bureau of Labor Statistics. 2010b. United States Department of Labor. <http://www.bls.gov/iif/oshwc/foi/cftb0243.pdf>, acedido em 15 de novembro de 2010.

⁸ "Serious Harm Accident Summary". 2003. <http://www.osh.dol.govt.nz/order/catalogue/pdfs/harmposter2003.pdf>, acedido em 15 de novembro de 2010.

⁹ Taxa de incidência = Número acidentes/número de trabalhadores.

¹⁰ Obtida em <http://metaweb.ine.pt/sine/anexos/pdf/ApresentacaoCAERev3.pdf>, acedido em 12 de outubro de 2010.

¹¹ Disponível em <http://www.dgeg.pt/Minas e Pedreiras/Informação Estatística/Industria Extrativa, número 13 2010/i010287.pdf>, acedido em 19 de novembro de 2012.

¹² PIB de 2010: Aproximadamente 172.7 Biliões €, valor disponível em www.pordata.pt, acedido em 13 de setembro de 2012.

Importa salientar que, das minas em laboração no país, as mais profundas inserem-se no grupo de explorações de minérios metálicos (ex.: complexo de Neves Corvo), onde o problema de ambiente térmico se coloca com maior acuidade, razão pela qual será sobre este tipo de unidades que incidirá este estudo. Daí o interesse em explicitar os seus valores de produção (absolutos e relativos) desagregados do total, evidenciando a sua dimensão económica.

Sobre este aspeto, numa análise de maior detalhe, constata-se que a produção de concentrado de cobre representa a quase totalidade do valor dos minérios metálicos produzidos no período de 2003 a 2010, conforme se pode observar no gráfico da figura 1.1.

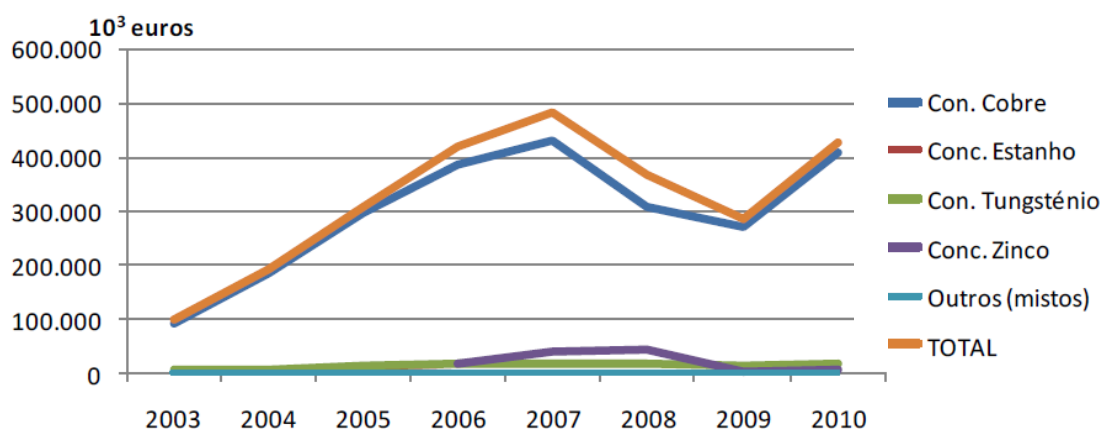


Figura 1.1 – Evolução do valor da produção de minérios metálicos (2003-2010)

Fonte: DGEG (2011)

De notar que a extração de minério de cobre ocorre fundamentalmente nas minas de Neves Corvo, sob administração e gestão de um único operador de mercado. Nesse sentido, verifica-se que se concentra num único *'player'*, a geração de riqueza deste subsector.

Da análise dos dados apresentados, constata-se que os valores envolvidos nesta atividade industrial possuem uma escala suficiente para afetar os valores do PIB nacional, pelo que a sua relevância, também no plano económico, é inquestionável.

Ainda sobre este plano, uma última nota para se referir que a extração de cobre em território nacional representou - no ano de 2010, em quantidade - 0,46% da produção mundial desse metal, a qual atingiu $15.747 \times 10^6 \text{ kg}^{13}$ (*United States Geological Survey Mineral Resources Program*)¹⁴, donde se pode inferir a sua dimensão e importância à escala mundial (e não, apenas nacional).

Uma outra ótica a considerar na análise do setor, será a sua perspetiva de crescimento e evolução das condições de mercado dos seus produtos. Insere-se aqui uma observação sobre o acréscimo de transparência de informação que tem vindo a ocorrer no setor, no

¹³ No original 16.000.000 *Metric Tonnes*. Fator de conversão: 1 *Metric Ton* = 984,207 Kg, obtido em <http://www.convertunits.com/from/metric+ton/to/ton>, acedido em 15 de outubro de 2012.

¹⁴ "Copper: world mine production, by country 2011", disponível em http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/copper/copper_t20.html, acedido em 21 de novembro de 2012.

passado recente (finais dos anos 90): como referem Steyn e Minnitt (2010b), reportando-se às alterações no mercado do carvão, a informação sobre preços, que antes era escassa e de natureza subjetiva, é hoje acessível a todos, diariamente.

Retomando a visualização do gráfico relativo à evolução do valor da produção de minérios metálicos (figura 1.1), verifica-se que existe um crescimento entre 2003 e 2007, um decréscimo entre 2007 e 2009 e a retoma de crescimento de 2009 para 2010.

O valor das receitas consideradas, em cada ano, resulta da multiplicação da quantidade produzida pelo preço de mercado, pelo que é desejável conhecer a evolução separada dessas duas componentes, para a tentativa de explicação da tendência de inversão de crescimento ocorrida a partir de 2007.

Para tal, considere-se a figura 1.2, construída com base nos dados desagregados em quantidade produzida e valor de comercialização de concentrados de minérios metálicos, relativos ao período compreendido entre 2007-2010, disponibilizados pela Direção Geral de Energia e Geologia, em 2011¹⁵.

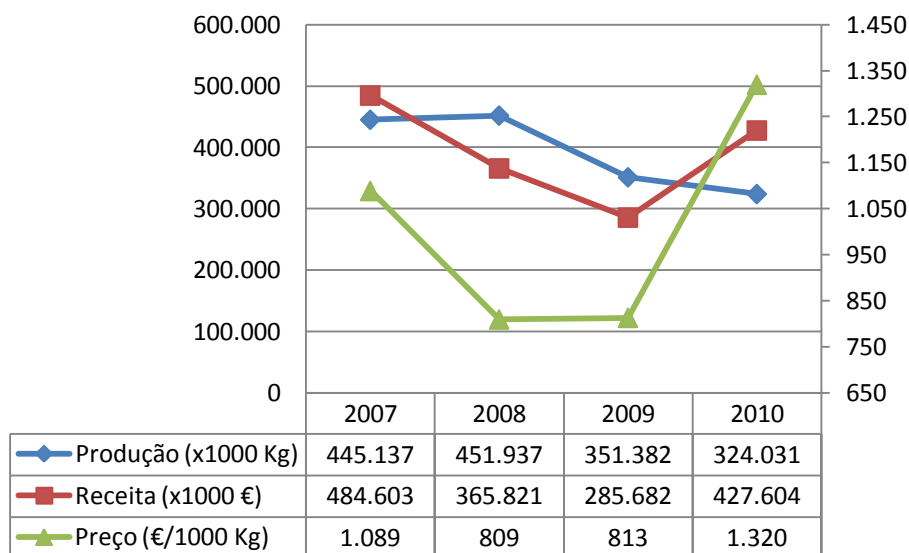


Figura 1.2 – Evolução da produção de minérios metálicos, em quantidade e valor (2007-2010)

Fonte: Adaptado de DGEG (2011)

A sua análise permite diferenciar três zonas distintas:

- 2007-2008: Entre estes dois anos, a produção física cresceu (+1.5%), diminuindo a receita final (-24.5%). Em 2008, foi comercializada uma maior quantidade de produto a que correspondeu uma grande quebra na receita. Neste caso, existiu uma forte diminuição do preço de mercado (1.089 para 809 €/1000 kg);
- 2008-2009: Neste período, as curvas representativas da quantidade e valor apresentam um andamento quase paralelo, decrescente, correspondendo à

¹⁵ Disponível em <http://www.dgeg.pt/Minas e Pedreiras/Informação Estatística/Indústria Extrativa, nº 13 2010/i010287.pdf>, acedido em 19 de novembro de 2012.

diminuição de, respetivamente, -22.3% e -21.9%. A redução de receitas ocorreu devido á quebra de produção, existindo, mesmo assim, uma ligeira subida no preço (809 para 813 €/1000 kg), o que justifica que a quebra percentual ocorrida no valor seja ligeiramente inferior à verificada na quantidade;

- 2009-2010: Entre estes dois anos, ocorreu uma diminuição de produção (-7.8%) a que correspondeu um aumento de receita (49.7%), apenas justificado por um forte aumento de preço de mercado (813 para 1320 €/1000 kg).

Verifica-se que entre 2007 e 2008, ocorreu uma forte diminuição no preço de mercado destas matérias-primas, o que está certamente relacionado com o surgimento da crise económico-financeira mundial nesse período, que criou uma elevada incerteza, perturbando os mercados e reduzindo drasticamente a procura e, por consequência, o preço.

Após 2008, o preço inicia um ciclo de subida. Por exemplo, para o cobre, os preços têm aumentado constantemente (Fiscor 2010b), tendência que se manteve em 2009-2010 (Fiscor 2011). Esta orientação pode ser justificada pela pressão das economias emergentes, com grandes taxas de crescimento económico e elevada demografia, que necessitam de quantidades crescentes de matérias-primas para alimentar os seus setores produtivos, impulsionando o crescimento da procura e a alta dos preços. A este propósito, Fiscor (2010b) refere que, em 2009, os chineses aumentaram o consumo de cobre em 38%, em oposição ao decréscimo de 16% ocorrido no consumo do resto do mundo. A China é, nesse ano, já responsável pelo consumo de 40% da produção mundial de cobre, especulando-se que aquele país estaria a constituir *stocks* de antecipação, com base na previsão de melhoria geral da economia mundial e na estimativa de que os preços subiriam a patamares entre 5.900 a 6.350 euros/tonelada¹⁶, durante o ano de 2011 (Fiscor 2010b). Os dados reais relativos aos preços do cobre, em finais de 2010, apontam para uma cotação em torno de 7.360 €/ton¹⁷ (Jornal de Negócios Online).¹⁸

Essa situação é confirmada pela evolução de preços no período de julho de 2010 a janeiro de 2011, que pode ser constatada na figura 1.3 (Fiscor 2011). Estes dados, em conjunto, vêm demonstrar que as estimativas anteriores ‘pecaram por defeito’, pois já em finais de 2010 o preço da tonelada de cobre se encontrava muito acima da previsão.

Com a manutenção das cotações dos metais em alta, a síntese descritiva da informação estatística disponibilizada pela DGEG (2011)¹⁹, refere que no ano de 2010 se “*verificou um forte interesse no investimento em novos projetos no sector dos minerais metálicos, nomeadamente de ouro, metais básicos e volfrâmio*”, em Portugal, o que perspetiva que essas condições de mercado se manterão no futuro, incentivando o desenvolvimento e aumento de atividade deste setor.

¹⁶ Correspondentes a 7.800 a 8.400 dólares/tonelada, indicados no original. Conversão efetuada utilizando uma taxa de câmbio média (2 anos) de 1.3227\$/€, obtida em: <http://pt.exchangerates.org.uk/historico/EUR-USD.html#gráficos>, acedido em 10 de outubro de 2012.

¹⁷ 441,8 cêntimos de dólar/libra.

¹⁸ “Cotação do Cobre mantém-se num nível muito elevado”, 27 de abril de 2011, 15h28m. Disponível em <http://www.jornaldenegocios.pt/>, acedido em 1 de outubro de 2012.

¹⁹ Disponível em <http://www.dgeg.pt/Minas e Pedreiras/Informação Estatística/Industria Extractiva, nº 13 2010/i010287.pdf>, acedido em 19 de novembro de 2012.

No plano internacional, corroborando essa tendência de ampliação da capacidade produtiva, como resposta ao aumento de procura do mercado, pode referir-se, a título de exemplo, que “o Chile e o Peru, que produzem 45% do cobre mundial, aumentaram a produção em três vezes, nos últimos 20 anos” (Jara, Pérez e Villalobos 2010) e o setor mineiro australiano, numa previsão para o período de 2008 a 2020 efetuada pelo *The Minerals Council of Australia*, estima que o número de trabalhadores do setor crescerá em mais de 86.000, a que corresponde a maior taxa de crescimento de emprego (85%) do país, atingindo o número de 215.000 trabalhadores no último ano do período considerado (MCA 2008).

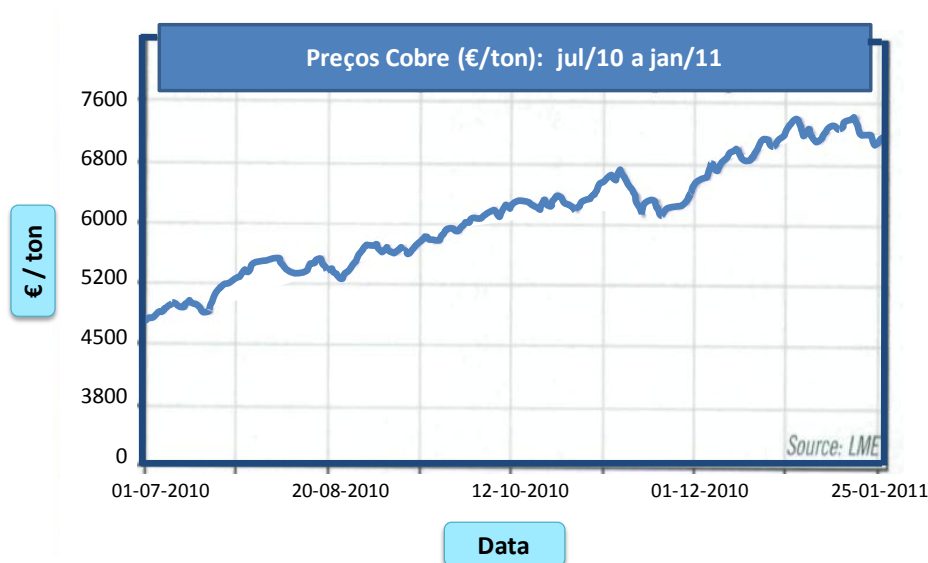


Figura 1.3 – Evolução do preço do cobre (julho 2010 a janeiro 2011)

Fonte: Adaptado de Fiscor (2011)

A empresa *Xstrata Copper*, gestora da mina metálica canadiana *Kidd Creek* (a mais profunda em atividade, a nível mundial), anunciou um investimento adicional de aproximadamente 94 milhões de euros²⁰, para aumentar a exploração em profundidade (até aproximadamente 2.900 metros²¹), prevendo atingir um acréscimo de produção de 3.4 milhões de toneladas e o prolongamento da vida da mina até 2017 (Fiscor 2008).

Também a maior mina de cobre e ouro (*Freeport McMoRan Copper & Gold's Grasberg*), situada na Papua, Indonésia, está a atingir o limite de exploração à superfície, estando prevista a sua progressão, subterrânea, a partir de 2016 (Fiscor 2010a). Analogamente, uma das maiores minas de cobre a céu aberto do Chile (*Codelco's Chuquibambilla*) irá evoluir no mesmo sentido em 2018, conforme refere o mesmo documento.

Da conjugação da informação apresentada, centrada nos minérios metálicos (em particular no cobre, sem perda de generalidade), pode depreender-se que as perspetivas de evolução do setor mineiro apontam, indubitavelmente, no sentido do aumento da sua produção. Essa

²⁰ Equivalente a 121 milhões de dólares canadianos.

²¹ 9.500 feet.

circunstância pode concretizar-se pela abertura de novas unidades (como referido pela DGEG)²² ou pela intensificação da exploração nas existentes. Neste ultimo caso, será necessário extrair minério em jazigos cada vez mais profundos, conforme o mesmo se vai esgotando nos níveis mais superficiais. Esta situação tem como consequência o acréscimo de temperatura decorrente do incremento de profundidade (gradiente geotérmico terrestre de, aproximadamente, 3°C/100m) e, consequentemente, o aumento do nível de risco para os trabalhadores, face ao agravamento sistemático das condições de ambiente térmico nas frentes de trabalho subterrâneo.

Os riscos associados à degradação dessas condições ambientais são de natureza diversa: Donoghue (2005) e Gancev (2006) sintetizam os diversos problemas de saúde (choque, exaustão e câibras térmicas, 'miliária rubra') causados pelo calor, no interior de minas e Sá (1999) descreve as consequências (convulsões, alucinações, coma, morte, vertigens, tonturas, transpiração intensa, dores de cabeça fortes, diminuição da capacidade mental e da destreza, aumento do tempo de reação, câibras térmicas) das disfunções orgânicas (choque e colapso térmicos, desidratação, desmineralização) causadas pelo stress térmico.

Paralelamente aos distúrbios funcionais descritos, também são referidas alterações comportamentais e de desempenho, nomeadamente, em Lamberts e Xavier (2002, 4) é indicado que *“os estudos mostram uma clara tendência de que o desconforto causado pelo calor ou frio reduz a performance humana”*²³. *As atividades intelectuais, manuais e perceptivas, geralmente apresentam um melhor rendimento quando realizadas em conforto térmico*. Relativamente a situações de stress térmico, os mesmos autores²⁴ referem que *“o ser humano, no desempenho de suas atividades, quando submetido a condições de stress térmico, tem entre outros sintomas, a debilidade do estado geral de saúde, alterações das reações psicossensoriais e a queda da capacidade de produção.”*

Corroborando esta ideia, é também indicado em Sá (1999) que nas situações de stress térmico *“a concentração e a capacidade física dos trabalhadores é afetada, o que naturalmente irá comprometer a produtividade da empresa e, não menos importante, irá criar condições favoráveis à ocorrência de acidentes de trabalho.”*

Verifica-se, assim, que a pressão de mercado impele o setor a operar numa conjuntura de ambiente térmico mais severa, o que interfere negativamente nas condições de segurança, saúde e produtividade dos trabalhadores.

Os aspetos focados na descrição deste ponto (ex.: dimensão, ‘peso’ económico-social, perspetivas de evolução do mercado e das condições de ambiente térmico, índices de sinistralidade do setor) fundamentam a necessidade e interesse na realização de investigação complementar sobre essas temáticas, que permita dar resposta aos novos desafios que se colocam e que seguidamente se sintetizam:

- Em condições de ambiente térmico mais adversas, aumentar a produção, garantindo a manutenção de condições de segurança e saúde adequadas para os trabalhadores

²² Disponível em <http://www.dgeg.pt/Minas e Pedreiras/Informação Estatística/Industria Extractiva, nº 13 2010/i010287.pdf>, acedido em 19 de novembro de 2012.

²³ Embora os resultados de inúmeras investigações não sejam conclusivas a esse respeito, como também referem os mesmos autores.

²⁴ pp. 71, do mesmo documento.

e, simultaneamente, níveis de produtividade que assegurem, às empresas do setor, uma posição concorrencial sustentável.

O trabalho de investigação que se propõe integra os elementos e contexto supracitados, pelo que se considera justificado o seu interesse e atualidade.

1.4 Hipóteses de trabalho

O desenvolvimento do trabalho pressupõe a realização de várias etapas e tarefas que se conjugam para a obtenção de um modelo final que integre a problemática tratada, de modo coerente e consistente, visando contribuir para o progresso do setor, nos planos económico, operacional e de segurança.

Nessa perspetiva, considere-se como ‘ponto de partida’ o estabelecimento do conjunto de hipóteses que se pretendem avaliar e que encerram as questões fundamentais do problema a analisar.

Com o propósito de expor e descrever as hipóteses a estudar (H_1 a H_6), veja-se o esquema apresentado na figura 1.4, onde se considera que as hipóteses H_1 , H_2 e H_3 se referem a ‘efeitos diretos’ nas variáveis, servindo de suporte ao estabelecimento das hipóteses globais H_4 e H_5 , correspondentes a ‘efeitos indiretos’ entre as grandezas consideradas.

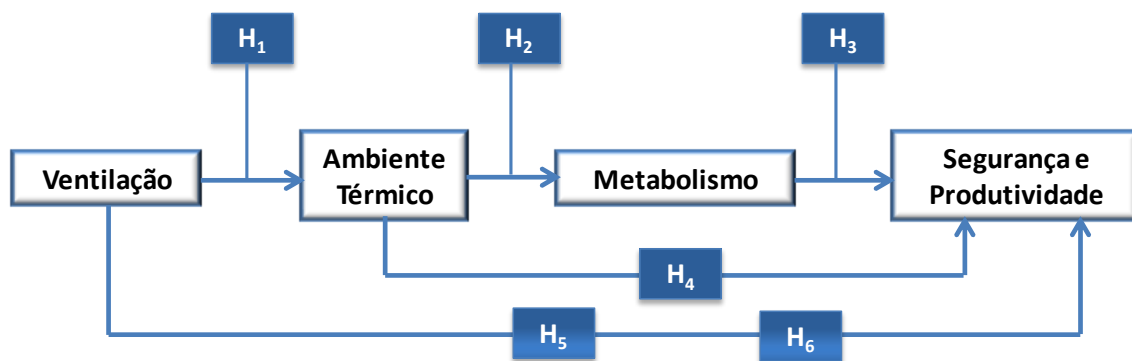


Figura 1.4 – Hipóteses de trabalho

As hipóteses esquematizadas podem ser descritas pelas seguintes redações:

- H_1 : As condições de ventilação condicionam o ambiente térmico do espaço considerado;
- H_2 : O ambiente térmico condiciona o metabolismo dos trabalhadores;
- H_3 : O metabolismo dos trabalhadores condiciona as condições de segurança ocupacional e produtividade laboral;
- H_4 : O ambiente térmico condiciona as condições de segurança ocupacional e produtividade laboral;
- H_5 : As condições de ventilação condicionam as condições de segurança ocupacional e produtividade laboral;

- H_6 : As variações nas condições de ventilação, segurança e produtividade podem ser quantificadas em termos económicos (unidades monetárias).

É de realçar que o modelo final incorpora as funções que relacionam as variáveis inerentes a cada uma das hipóteses consideradas (H_1 a H_5), culminando no estabelecimento do balanço custo/benefício - objetivo central e final do modelo – através da repercussão económica (H_6) do impacto da ventilação na produtividade e segurança ocupacionais (H_5).

Quanto à forma de validação das hipóteses (modelo), perspetiva-se a sua realização integrada num projeto de investigação de maiores dimensões, subdividido em três fases sequenciais e complementares, correspondentes a três subprojectos de execução, a saber:

1. Plano teórico e concetual: Avaliação e validação das hipóteses à luz da informação técnico-científica publicada e posterior conceção de um modelo quantitativo composto por funções que reflitam a variabilidade das variáveis que o constituem;
2. Plano experimental: Recolha de dados num ambiente controlado, nomeadamente através de ensaios, com voluntários, na câmara climática existente no Laboratório de Prevenção de Riscos Ocupacionais e Ambientais (PROA) da FEUP;
3. Plano aplicado: Recolha de dados em contexto real de trabalho, em concreto nas atividades desenvolvidas nas frentes de trabalho de minas subterrâneas.

O desenvolvimento do presente trabalho será focado essencialmente na fase 1, a qual constitui os alicerces do grande projeto acima referido. Esta fase justifica-se pela inexistência de modelos que permitam perspetivar, prever e otimizar uma relação entre Ambiente-térmico / Consumos energéticos / Produtividade. Apesar da existência de modelos propostos por vários autores (Koehn e Brown 1985; Thomas e Yiakoumis 1987; Mohamed e Srinavin 2005; Zhao, Zhu e Lu 2009) que tentam relacionar condições de ambiente térmico com produtividade, estes constituem-se de âmbito limitado em termos de amplitude térmica de usabilidade e nenhum incorpora as vertentes de controlo e otimização da relação entre custos energéticos e produtividade (Sousa e Baptista 2014). Assim, a abordagem agora proposta, assente na quantificação económica das relações entre condições de ventilação, ambiente térmico, metabolismo, produtividade e segurança ocupacional é inovadora e inédita, não existindo, que se conheça, algum modelo prévio que possa ser utilizado como base de um desenvolvimento evolutivo de adaptação aos objetivos e finalidades desejadas, situação que a existir reduziria drasticamente o tempo necessário ao desenvolvimento do modelo e permitiria avançar de imediato para a fase 2.

As duas fases seguintes constituem também, por si só, projetos de investigação de dimensão significativa. Numa perspetiva preliminar é possível identificar um conjunto de tarefas e lacunas de conhecimento que, por si mesmas, dão a cada uma das seguintes fases uma dimensão assinalável em termos de investigação e desenvolvimento:

- A instalação física de uma câmara climática com cerca de $10m^2$ no laboratório da FEUP no período de desenvolvimento do presente trabalho irá permitir a realização dos ensaios necessários à concretização da fase 2. Será aí fundamental conhecer a resposta humana a ciclos de trabalho / descanso em diferentes condições de temperatura e humidade e, com diferentes níveis de esforço. A realização destes ensaios é, em si, complexa, uma vez que é necessário uma monitorização rigorosa de um conjunto de parâmetros como a temperatura interna,

temperatura da pele e o ritmo cardíaco. Para ter resultados significativos, terá de envolver ainda um número significativo de sujeitos. Terá, por isso de cumprir vários tipos de requisitos relativos a aspetos de ordem técnica (ex.: testes iniciais aos equipamentos e software de controlo e aquisição de dados, estabelecimento de protocolos de ensaio), operacional (ex.: recrutamento, seleção e disponibilidade de voluntários) ou administrativa (ex.: anuência da comissão de ética da Universidade do Porto).

- A fase 3, que permitirá fazer o *scale up* do conhecimento obtido em condições controladas, irá exigir a recolha de dados em contexto real sob diferentes condições de ambiente térmico e esforço físico nos espaços de trabalho subterrâneos. Esta fase será, no entanto, crucial para a parametrização final e validação do modelo para as condições às quais se destina.

Salienta-se, porém, a complementaridade das três fases enunciadas, fundamentais para a validação das hipóteses e do modelo final, assunto que será retomado e detalhado nos capítulos seguintes.

Concluída a exposição acerca das hipóteses de trabalho, finaliza-se este capítulo introdutório com a indicação da estrutura utilizada para a apresentação dos conteúdos relativos ao tratamento do tema, nos capítulos subsequentes, a saber:

- No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica efetuada, a qual incidiu, essencialmente, sobre o setor mineiro, a problemática do ambiente térmico e os aspetos conexos com a produtividade e a segurança ocupacionais. São ainda indicadas, no início desse capítulo, as estratégias de pesquisa utilizadas, em concreto, as fontes, motores de busca e palavras-chave, bem como os resultados que as mesmas retornaram;
- No capítulo 3, definem-se e descrevem-se os objetivos a atingir com a execução do trabalho. Tais objetivos centram-se, num primeiro nível, em torno da quantificação da influência de ambientes térmicos quentes e húmidos no desempenho e segurança dos indivíduos que lhes estão expostos e, num segundo nível, sobre o impacte económico, baseado num balanço ‘*custo-benefício*’ entre os níveis de produtividade e segurança ocupacionais *versus* consumos de energia para controlo das condições de ambiente térmico no espaço. São também aqui referidas as metodologias a aplicar na mensuração das diversas grandezas de interesse e na concretização dos objetivos estipulados;
- No capítulo 4 desenvolvem-se e apresentam-se as funções que relacionam as variáveis ambientais (térmicas) com os níveis de desempenho dos indivíduos (produtividade e segurança), culminando no ‘desenho’ de um modelo relacional que integra a função custo total (em unidades monetárias) a utilizar no processo de otimização.

São descritas três variantes do modelo global, contemplando: uma versão, em que as funções são obtidas através da estimativa do comportamento das variáveis (*Set 0_T*), num plano teórico; uma outra, em que se propõe a parametrização das funções de acordo com os dados recolhidos em ensaios na câmara climática (*Set 0_P*) e uma terceira versão, em que se utiliza um modelo de produtividade

publicado (*Set I*), identificado na pesquisa bibliográfica efetuada, como instrumento para avaliação quantitativa das alterações de produtividade associada às condições de ambiente térmico;

- No capítulo 5 apresentam-se os dados utilizados e o modo como os mesmos foram recolhidos e tratados. Sobre este aspeto, a análise e apresentação engloba duas vertentes: uma, centrada nos dados de entrada (*input*) relativos às variáveis independentes e, outra, focada nos dados de saída (*output*), resultantes da simulação do modelo para os intervalos de valores correspondentes aos domínios das funções que o constituem;
- Seguidamente, no capítulo 6, analisam-se e discutem-se os resultados obtidos no capítulo precedente a partir dos modelos. Dessa discussão – em termos absolutos e relativos – resulta a validação (ou não) da aplicabilidade dos modelos estudados. Complementarmente, é também apresentada a análise de sensibilidade do modelo a possíveis variações paramétricas nas funções que o integram;
- Por fim, no capítulo 7, que encerra o trabalho, são referidas algumas considerações finais acerca das características fundamentais do modelo proposto, dos constrangimentos e lacunas verificadas no decurso do seu desenvolvimento, as consequentes limitações impostas aos resultados obtidos, bem como as perspetivas de evolução futura do tema e das aplicações do modelo global construído.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo descreve-se o levantamento de informação efetuado em diversos tipos de plataformas (bibliotecas físicas e virtuais, bases de dados, revistas científicas, ‘sites’ institucionais) e suportes (documentos impressos e eletrónicos). O seu objetivo será o de fundamentar, por um lado, o quadro referencial (técnico-científico) de suporte ao trabalho e, por outro, a necessidade de investigação complementar, nos temas e âmbito do estudo.

As grandes áreas temáticas que incorporam a pesquisa sintetizam-se na figura 2.1.

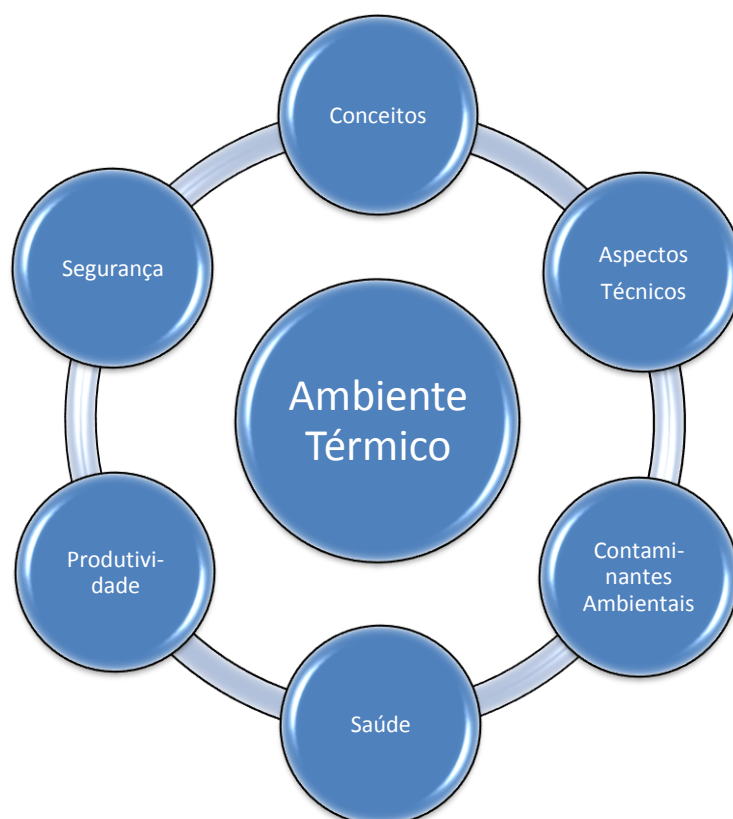


Figura 2.1 – Ambiente térmico e aspetos correlacionados

Conforme já foi anteriormente referido, o cerne do problema que se pretende tratar envolve a interação entre o ambiente térmico, a produtividade e a segurança ocupacional.

No entanto, numa apreciação holística e sistémica desta problemática, os restantes aspetos são igualmente importantes, pelo que se optou por realizar uma pesquisa geral, nas principais vertentes. Esta estratégia permitirá - através dos trabalhos produzidos - identificar a situação atual e fechar o ‘círculo’ do diagrama apresentado na figura 2.1.

Obviamente, será enfatizada a pesquisa dirigida aos três elementos principais, inicialmente referenciados.

Os restantes constituirão aspetos complementares, instrumentais ou de enquadramento, no desenvolvimento posterior do presente trabalho.

2.1 Estratégias de pesquisa

A pesquisa foi direcionada para os temas de interesse, através da utilização individual e/ou combinada das seguintes palavras-chave: “heat”, “heat mining”, “heat stress”, “heat treatment”, “high-temperature”, “hot environment”, “hot temperature”, “human health”, “mines”, “mine accident rate”, “mine heat”, “mine productivity”, “mining”, “mining industry”, “productivity”, “safety”, “safety index”, “thermal”, “thermal comfort”, “thermal stress”, “thermal environment”, “thermal index”. Para o efeito, foi utilizado o motor de busca Metalib®, disponibilizado pelos Serviços de Documentação e Informação (SDI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A utilização do referido conjunto de palavras retornou um enorme número de documentos que satisfizeram os critérios gerais de pesquisa, conforme se exemplifica no quadro 2.1, para a utilização da palavra-chave ‘Thermal Stress’.

Quadro 2.1 – Exemplo de resultados de pesquisa

Palavra-Chave	Tipo de Recurso	Número Ocorrências
<i>Thermal Stress</i>	Bases Dados	103.893
<i>Thermal Stress</i>	Revistas Científicas	453.226

originando um total de mais de 557.000 registos, para os dois tipos de recursos.

Uma das estratégias de refinamento da pesquisa consistiu em combinar outras palavras-chave, até um máximo de três níveis. No quadro 2.2, apresenta-se a aplicação da mesma ao exemplo anterior, apenas para o tipo de recurso “Revistas Científicas”.

Quadro 2.2 – Exemplo de refinamento da pesquisa (em profundidade)

Palavra-Chave	Tipo de Recurso	Número Ocorrências
<i>Thermal Stress+ Mining</i>	Revistas Científicas	16.863
<i>Thermal Stress+ Mining + Ano >2005</i>	Revistas Científicas	36

No último caso, foi utilizada uma combinação de três níveis (máximo): duas palavras-chave (*Thermal Stress + Mining*) conjugadas com a data de publicação do documento ser posterior ao ano de 2005 (mais recentes), a qual retornou 36 registos.

Da leitura dos resumos dos documentos correspondentes às 36 ocorrências obtidas, verificou-se que apenas um tem interesse potencial para o estudo. Neste caso, as razões de exclusão dos restantes são, essencialmente, por abordarem questões relacionadas com a análise de tensões térmicas nos maciços rochosos subterrâneos (e não nas pessoas), o que não se insere no âmbito do presente estudo.

É de notar que no exemplo apresentado, não foram definidas restrições aos campos considerados na pesquisa, ou seja, todos foram objeto de averiguação. No entanto, noutras situações em que a consulta global (3 níveis) devolveu um número elevado de resultados, reformulou-se a busca através da limitação dos campos a investigar (ex.: *Abstract*, *Subject* ou *Title*). Outras estratégias de refinamento da pesquisa foram também adotadas - em alternativa ou complemento às acima descritas - sempre que os resultados se mostraram excessivos. No quadro 2.3 enumeram-se as opções utilizadas.

Quadro 2.3 – Estratégias de refinamento da pesquisa

Objeto	Estratégia (Ex.)	Observações
Palavra-chave	Combinar, até 3 níveis	Incluindo tópicos como data, autor, publicação
Campo	Limitar incidência da pesquisa	Selecionar campos (<i>Abstract</i> , <i>Subject</i> ou <i>Title</i>)
Categoria de recurso	Engenharia	Limitação de área científica, em alternativa à pesquisa global
Tipo de recurso	Base de dados ou Revista científica ou Ebook	Pesquisa por tipo
Designação de recurso	Designar o recurso a pesquisar, dentro de cada tipo	Pesquisa individualizada, por publicação

Para cada tipo de recurso (bases de dados, revistas científicas ou *e-books*) existem várias publicações, tendo sido consideradas as seguintes:

- Bases de dados - *Academic Search Complete*; *Compendex*; *Current Contents*; *ERIC*; *Inspec*; *Science Citation Index*; *Science & Technology Proceedings*; *SCOPUS*; *Web of Science*;
- Revistas científicas - *ACM Digital Library*; *ACS Journals*; *ASME Digital Library*; *CE Database (ASCE)*; *IEEE Xplore*; *IOP Journals*; *nature.com*; *Royal Society of Chemistry*; *ScienceDirect*; *SIAM*;
- *E-Books* - *Ebrary*; *Referex*; *ScienceDirect*.

A última estratégia apresentada no quadro 2.3 consiste em pesquisar seletivamente cada um dos recursos individuais acima identificados, em alternativa à pesquisa conjunta (por tipo).

Apresentadas as estratégias utilizadas na pesquisa bibliográfica, são indicadas no anexo 2.1 as diversas combinações usadas e os resultados por elas produzidos.

Outros aspetos considerados no processo de seleção de informação foram os critérios de exclusão de resultados retornados pela pesquisa. Várias são as causas que conduzem à rejeição de documentos, seja por razões de ‘acessibilidade’ ou de ‘conteúdo’.

Apresenta-se, na lista seguinte, a enumeração dos fatores inscritos em cada uma dessas duas categorias.

- **Acessibilidade:**
 - ✧ Sem abstract: Documentos que não apresentam resumo (ou outro qualquer ponto), cuja leitura permita uma análise prévia do interesse do seu conteúdo;
 - ✧ Linguagem: Documentos redigidos na língua nativa dos seus autores, com tradução inexistente. (Ex.: Chinês, Turco, Polaco);
- **Conteúdo:**
 - ✧ Tema: Documentos que abordam assuntos distintos, dos que se consideram integrados ou relevantes para o âmbito do estudo;
 - ✧ Abordagem: Tratamento dos temas baseado em perspetivas divergentes das pretendidas;
 - ✧ Âmbito setorial: Estudos e aplicações em contextos diferentes do objeto de estudo;
 - ✧ Atualidade: Documentos cujo conteúdo está desatualizado, face a informação publicada posteriormente, desde que os mesmos não sejam considerados ‘*milestones*’ de referência no processo de evolução histórica.

A aplicação destes critérios de exclusão aos resultados das diversas combinações de pesquisa culminou na identificação dos documentos restantes como de “interesse para o estudo”. A quantidade de documentos com potencial relevância é indicada, caso a caso, na última coluna dos quadros que integram o anexo 2.1.

2.2 Pesquisa bibliográfica

A diversidade de palavras-chave utilizadas na busca de informação (ver ponto 2.1) evidencia a multiplicidade de temas e assuntos a abordar, para concretizar os objetivos globais do trabalho.

De modo a tornar clara a exposição detalhada do ‘estado de arte’ das problemáticas a tratar, considera-se ser desejável que a mesma se efetue, inicialmente, de modo separado, para cada grupo temático. Após essa descrição, focada nos aspetos essenciais de cada conjunto (setor de atividade, ambiente térmico, segurança ocupacional, produtividade), serão posteriormente apresentados as relações entre eles, o que permitirá corporizar a visão holística pretendida para o tratamento da realidade. Esta é a estratégia adotada na descrição posterior, do presente capítulo.

2.2.1 Setor mineiro

A atividade mineira em Portugal remonta à época romana (séc. I a III) conforme relata Duarte (s.d.), baseando-se nos registos escritos conhecidos. Este autor refere esse período, conjuntamente com o séc. XIX, como as duas épocas áureas da história das minas nacionais. Poder-se-á dizer que esta atividade tem acompanhado o desenvolvimento das civilizações e respetivos povos ao longo dos tempos, fornecendo-lhes matéria-prima para a elaboração de utensílios, ferramentas, infraestruturas, adereços ou disponibilizando

combustíveis, água, entre outros. Sem o contributo deste sector o mundo, tal como o conhecemos, não seria possível.

Estamos, no momento presente, numa era equivalente à da revolução industrial, em que a atividade mineira é um elemento central para o desenvolvimento socioeconómico universal, dando resposta às pressões de um mercado de consumo ávido e em crescimento, que se caracteriza por elevadas exigências de ‘quantidade’ e ‘velocidade’, quanto ao seu abastecimento. O setor posiciona-se a montante da indústria transformadora, como fornecedor da matéria-prima necessária à produção de bens e produtos e a sua dimensão económica ficou bem patente na exposição apresentada no ponto 1.3. Este aspeto pode, no entanto, ser corroborado pelos exemplos seguintes, relativos a quantidades de minério extraídas (ou a extrair):

- O maior produtor de ouro do Canadá (a mina de *Williams*) obtém uma produção anual de quase 13 toneladas²⁵, a partir de 2,3 milhões de toneladas de minério (Smith e Arthur 1997);
- A mina de cobre e ouro Ernest Henry, situada no noroeste de Queensland, Austrália²⁶, tem uma produção anual corrente de 10 milhões toneladas (Allnutt 2008);
- A Africa do Sul produz, anualmente, aproximadamente 245 milhões de toneladas de carvão (Steyn e Minnitt 2010a) e estima-se que existam neste país reservas de 40.000 toneladas de ouro, por explorar (Rawlins e Phillips 2005);
- A produção de carvão nos EUA aumentou de 573 milhões de toneladas, em 1978, para 1.100 milhões de toneladas, em 2006 (Kecojevic e Grayson 2008).

A escala dos valores fornecidos por estes exemplos (milhares de milhões de toneladas), em quatro localizações geográficas distintas, permite compreender o forte impacto do setor extrativo. A sua influência transcende o plano económico (anteriormente focado), estendendo-se, nomeadamente, às vertentes pessoal, ambiental e estratégica, como seguidamente se exemplifica:

- Pessoal: face ao enorme volume de massas a extrair e movimentar, a quantidade de trabalhadores envolvidos no processo é, também ela, elevada. A este propósito, refira-se a estimativa de aumento, apenas na Austrália, de 86.000 trabalhadores nesse setor, no período de 2008-2020 (MCA 2008). Acresce, que as condições em que os trabalhos subterrâneos se executam são normalmente severas e de elevado risco. A combinação desses dois elementos (elevada quantidade de pessoas participando em atividades de risco) conduz investigadores e empresas do setor a focarem a sua atenção na análise das condições de trabalho vigentes, suas consequências e possibilidades de melhoria. Nesse sentido, existem diversos estudos direcionados para a análise de sinistralidade e do tipo de medidas de melhoria a introduzir, apresentando-se, a título de exemplo, os seguintes:

²⁵ Correspondente a 450.000 onças.

²⁶ País líder na inovação tecnológica do setor, o que é atestado pelo elevado número de patentes registadas, de acordo com Hedges (2008).

- ✧ Estudos estatísticos que comparam o número de acidentes no setor mineiro com os valores ocorridos na indústria dos USA, em 1991-92 (Scharp 1993) ou a referência ao número de acidentes mortais na China, durante o ano de 2009 (Cui, You e Luo 2010)²⁷;
- ✧ Estudos visando a melhoria de desempenho dos trabalhadores da indústria mineira, em matéria de segurança, preconizando-se a aplicação de técnicas baseadas na realidade virtual, nas áreas de educação e formação, simulações e consciência de perigo (Kizil 2007). Também em *Capturing value from simulation* (2005) se propõe a aplicação de tecnologias de simulação dirigidas a operadores de máquinas, com o objetivo de melhorar a segurança e produtividade;
- ✧ Desenvolvimento de equipamentos mineiros de movimentação e transporte de cargas, com comando e controlo remoto (Larsson, Appelgren e Marshall 2010), (Larsson, Broxvall e Saffiotti 2008), (Larsson, Broxvall e Saffiotti 2006), de modo a minimizar o risco de acidentes com aqueles equipamentos. Também como reforço da segurança e produtividade em operações de carga-descarga de veículos é proposta a utilização de visão 'stereo', controlo remoto e automação tridimensional da operação (Whitehorn, et al. 2003).
- Ambiental (micro e macro): as questões ambientais, decorrentes da atividade mineira, podem ser observadas em duas escalas distintas:
 - ✧ Uma, 'micro' e localizada, relativa às condições ambientais nas frentes de trabalho, no interior da mina, que afetam as condições de trabalho;
 - ✧ Outra, 'macro', associada à contaminação ambiental e impacte paisagístico, decorrente das operações de mineração.

A primeira (micro) será objeto de referência mais detalhada na apresentação no ponto seguinte (problemática do ambiente térmico), em interligação com as técnicas de controlo atmosférico (monitorização e ventilação), devido ao seu particular interesse para o desenvolvimento do presente trabalho. Quanto à segunda (macro), refira-se, como exemplos, o trabalho realizado por Dirner, Kulova e Dobes (2010), onde são mencionadas as alterações paisagísticas ocorridas na República Checa, resultantes da extração de carvão. Referem ainda aqueles autores que esse tipo de exploração é das mais difundidas e intensas, extrapolando os efeitos ambientais nefastos a todos os outros países onde é exercida essa atividade. Também Maczkowiack *et al.* (2012) referem que as companhias mineiras, a nível mundial, procuram mitigar o impacte ambiental das suas atividades, através da adoção de programas de reabilitação dos terrenos utilizados, com o objetivo final de estabelecer condições aceitáveis e sustentáveis no uso posterior desses terrenos.

- Estratégico: tratando-se de recursos naturais não renováveis, por natureza, a intensidade e duração das explorações mineiras está intimamente relacionada com a quantidade e teor de minério existente num dado jazigo (para além das pressões

²⁷ Análises mais detalhadas sobre sinistralidade, segurança e produtividade serão apresentadas posteriormente, nos pontos correspondentes.

económicas anteriormente focadas). Nessa ótica, as decisões de produção são suportadas pela avaliação de ‘até que ponto é técnica e economicamente viável’ continuar a atividade, numa dada mina. Para quantificar esse ‘*break even point*’, Chamaret, O'Connor e Recoche (2007) propõem um conjunto de indicadores de ‘desenvolvimento sustentável’, que aplicaram numa mina de urânio nigeriana, resultando num instrumento de suporte às decisões estratégicas dos acionistas. Estes autores promovem o debate sobre a controvérsia internacional acerca das explorações mineiras e o seu desenvolvimento sustentável, enquanto Steyn e Minnitt (2010a) abordam o assunto noutra vertente, analisando as questões de *marketing* e comercialização de carvão produzido na África do Sul, bem como o *mix* de consumo interno/exportação. Este último aspeto é estratégico para o país, numa perspetiva de dependência energética e desenvolvimento industrial futuro, evidenciando a intervenção do setor no posicionamento e equilíbrio geoestratégico dos países, no contexto das suas relações político-económicas internacionais.

Vários outros fatores poderiam ser objeto de análise para a caracterização global do setor (tipos de exploração, equipamentos, processos, tipos de minério, níveis de risco, localizações geográficas, entre outros). Esses fatores não são aqui tratados por se considerar que estão fora do âmbito do presente trabalho.

Assim, a informação apresentada no ponto 1.3, complementada com a exposição precedente, entende-se ser suficiente para ilustrar o elevado impacto do setor mineiro na sociedade, quer seja pela sua dimensão e repercussão económica, quer pelas suas implicações nos trabalhadores ou nas vertentes ambiental e estratégica.

2.2.2 Problemática do ambiente térmico

O ambiente térmico nos locais de trabalho, em particular nas frentes mineiras subterrâneas, é um elemento central do estudo que se pretende concretizar. Sobre o tema, diversas abordagens têm sido utilizadas para a compreensão global do problema, incidindo sobre várias vertentes, nomeadamente, nos aspetos conceptuais, equilíbrios e balanços térmicos, efeitos e consequências nos trabalhadores, métodos e índices de monitorização e controlo, sistemas de ventilação, entre outros. A multiplicidade de questões que se colocam e que necessariamente se terão de integrar no tratamento global do assunto, podem, com vantagem para a clareza de exposição, ser abordadas separadamente. Essa estratégia de apresentação, que é consistente com a metodologia seguida nos pontos precedentes, é aqui também adotada, sem perda de generalidade. A integração final de conteúdos far-se-á posteriormente, na última parte do presente capítulo.

2.2.2.1 Quadro concetual

Como ponto de partida para a análise desta problemática, considera-se ser útil definir os principais conceitos a utilizar, os quais seguidamente se enumeram.

- Ambiente térmico: pode ser definido como “o conjunto das variáveis térmicas ou meteorológicas do local em questão, que influenciam as trocas de calor entre o meio e o organismo humano, sendo assim um fator que intervém - de forma direta ou indireta - na saúde e bem-estar dos indivíduos e na realização das suas tarefas diárias.” (Departamento Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo)(DCAUSP)²⁸.

A definição supra, integra um conjunto de elementos importantes para a compreensão do conceito, em sentido lato, pois refere não apenas as variáveis ou parâmetros térmicos (ambiente térmico, propriamente dito, em sentido restrito), mas também a sua interação com o ser humano e, conseqüentemente, com o seu estado de saúde e bem-estar. Esta visão é de particular interesse no tratamento do tema, que se segue, o qual se baseia na interligação de todos esses fatores.

- Conforto e desconforto térmico: A sensação de conforto (ou desconforto) térmico é um estado individual que depende de inúmeros fatores, pelo que é algo difícil de quantificar e definir. Segundo a ASHRAE²⁹, o conforto térmico define-se como “o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico”. Analogamente, o desconforto térmico expressa-se pela insatisfação, relativamente ao ambiente térmico. Estas definições, se bem que facilmente compreensíveis, não facultam instrumentos que possibilitem a avaliação dessa satisfação (Orosa 2009). A descrição anterior contempla unicamente o ‘estado de espírito’ do indivíduo, ou seja, a vertente mental e psicológica, de cariz tendencialmente subjetivo. Complementarmente, o conforto térmico pode ser visto e analisado sob outro ângulo, fundamentado nas condições físicas e ambientais que permitam a manutenção da temperatura interna do corpo humano, sem a necessidade de serem acionados os mecanismos biológicos termorreguladores (DCAUSP)³⁰, ou seja, em que o balanço térmico (ver definição seguinte) produz um resultado neutro ou de equilíbrio térmico.

Inserir-se aqui uma nota para referir que a descrição, no âmbito do presente ponto, é realizada numa perspetiva geral. Tal facto deve-se à especificidade do tema, o qual para ser abordado em todas as suas valências implicaria um tratamento em profundidade, especializado, que transcende o objetivo desta exposição. Assim, não são aqui desenvolvidos os aspetos instrumentais de obtenção dos índices de conforto térmico (ex.: classificação de isolamento de vestuário, limites de exposição, tipos e características dos sensores de aquisição de dados), a influência das atividades e taxas metabólicas, o desconforto localizado³¹ (ex.: causado por assimetria de radiação térmica, exposição a correntes de ar, diferenças na temperatura do ar ou

²⁸ Definição adaptada de “Ambiente térmico”, Departamento Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, disponível em http://www.master.iag.usp.br/conforto/ambiente_termico.html, acedido em 25 de outubro de 2010.

²⁹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Standard 90.1-2007 (I-P Edition). <http://www.ashrae.org/>, acedido a 24 de maio de 2012.

³⁰ Definição adaptada de DCAUSP, http://www.master.iag.usp.br/conforto/ambiente_termico.html, acedido em 25 de outubro de 2010.

³¹ Indicados em Lamberts e Xavier (2002).

temperaturas dos pisos) ou as medidas construtivas, organizacionais e de proteção a desenvolver para garantir condições de conforto térmico, para se citarem apenas alguns exemplos de exclusões consideradas. Os índices de conforto térmico serão, eles próprios, objeto de apresentação detalhada no ponto correspondente (seguinte, ponto 2.2.2.3).

- **Balanco Térmico:** contabilização das perdas e ganhos, nas trocas de calor com o ambiente. Para precisar este conceito, é necessário elencar os fatores que intervêm na sua determinação e o modo como se processam e quantificam as trocas de calor. Höppe (1993) refere que o único modo de descrever completamente os efeitos do ambiente térmico no corpo humano é fazê-lo através de uma equação de balanço energético, onde se considerem os parâmetros meteorológicos e as características biométricas e comportamentais (atividade e vestuário) relevantes. Ou seja, é necessário efetuar o balanço das trocas de calor³² para, posteriormente, se analisarem os efeitos produzidos no corpo humano. A permuta de calor entre um sujeito e a sua envolvente depende, então, dos seguintes elementos básicos:
 - ✧ Ocorrem trocas de calor entre o ser humano e o ambiente que o envolve, desde que exista um gradiente térmico entre eles;
 - ✧ Nível de atividade (tarefas/ocupações): A geração de calor no interior do corpo humano, por ação metabólica, depende da atividade física do indivíduo, sendo muito maior quando este executa esforços físicos intensos (metabolismo adicional, associado à atividade muscular) do que quando se encontra em repouso (metabolismo basal).
 - ✧ Interface indivíduo/ambiente: A permuta de calor é facilitada (dificultada) se as barreiras (ex.: vestuário) intercaladas entre as ‘fontes’ possuírem baixo (alto) isolamento térmico, facilitando (dificultando) essa transferência.
 - ✧ Ambiente: Nível de temperatura do meio envolvente ao indivíduo (T_{Ext}), para o qual se estabelece o balanço térmico.

Os processos de transmissão de calor entre o ser humano e o ambiente são constituídos por diferentes mecanismos, conforme esquematicamente se representa na figura 2.2.

É de salientar que, além dos três modos que tipicamente se consideram nas análises de fenómenos termodinâmicos – convecção, condução e radiação – neste caso, adicionam-se-lhes outros três: evaporação (suor), respiração (ar inspirado/expirado) e ingestão (alimentos/líquidos), conforme propõe Höppe (1993).

Tomando como elemento central o ser humano e a sua característica designada por homeotermia - que consiste na manutenção da temperatura interna do corpo, dentro de certos limites³³ - quando o balanço térmico, que conjuga os elementos anteriormente referidos (atividade, vestuário, T_{Ext}), resulta num desequilíbrio, o organismo desencadeia os mecanismos termorreguladores, tendentes a repor a

³² Genericamente, um balanço térmico mede o diferencial entre ‘entradas’ e ‘saídas’, de onde resulta um ‘ganho’, ‘perda’ ou o equilíbrio térmico final.

³³ Temperatura de equilíbrio: 37°C (98.6°F). Limites normais: 36.1°C - 37.2°C (97°F - 99°F). (Magalhães, et al. 2002).

temperatura em torno dos valores pré-estabelecidos³⁴, através da utilização das formas de transmissão de calor enunciadas.



Figura 2.2 - Formas de transferência de calor

Por exemplo, numa situação em que a temperatura corporal central excede os 37°C, inicia-se a produção e libertação de suor (*sudorese*) e a sua evaporação, que conduz à perda de calor pela superfície corporal (pele), como consequência da vaporização do líquido (suor). Este é, aliás, o mecanismo exclusivo de perda de calor em situações de temperatura ambiente superiores a 36°C, como referem Magalhães *et al.* (2002). Em síntese, o balanço das trocas de calor entre o indivíduo e o ambiente deve ser equilibrado, de modo a garantir a estabilidade térmica no interior do corpo humano. Os mecanismos de autorregulação do organismo tentam manter a sua temperatura constante, a cada momento, equilibrando a geração interna de calor (metabólica) com a dissipação de calor para o ambiente externo. Essas trocas processam-se através dos modos de transmissão de calor enunciados (convecção, radiação, condução, evaporação, respiração e ingestão), os quais dependem da temperatura ambiente, da temperatura dos alimentos ou líquidos ingeridos, do tipo de atividade e do grau de isolamento térmico do vestuário utilizado.

A sensação de conforto térmico do indivíduo está, pois, associada à manutenção do equilíbrio nas trocas de calor com a envolvente exterior.

- **Stresse térmico:** pode ser considerado como “*o estado psicofisiológico a que está submetida uma pessoa, quando exposta a situações ambientais extremas de frio ou calor.*” (Lamberts e Xavier 2002). As situações de stresse térmico, por se associarem a condições ambientais extremas, interferem no funcionamento metabólico do indivíduo e, consequentemente, podem afetar o seu estado geral de saúde e originar problemas graves, por excesso de frio (hipotermia) ou de calor (hipertermia).

³⁴ Se, numa dada circunstância, os mecanismos de regulação não forem suficientes, existe um desequilíbrio permanente que conduz a um ganho ou perda de calor pelo organismo, à falência de órgãos vitais e, consequentemente, à morte.

Na figura 2.3 apresentam-se, de forma qualitativa, as zonas de conforto/desconforto e stresse térmicos, em função dos ambientes serem, respetivamente, moderados ou extremos.

Numa aplicação ao setor mineiro subterrâneo, as condições de ambiente térmico são normalmente severas (temperaturas e humidades elevadas) e agravam-se com o aumento da profundidade (Zhao, et al. 2007), (Long, et al. 2008), tornando o problema “*cada vez mais e mais óbvio*” (Jielin, et al. 2007).

É de notar que em regiões tropicais e em que são utilizados equipamentos *diesel* de grande potência na extração mineira, o calor pode ser um importante problema, mesmo a profundidades relativamente baixas, conforme refere Howes (2005).



Figura 2.3 – Relação entre temperaturas e zonas de sensações térmicas

A análise e correção da situação passará, por um lado, por evitar condições que conduzam a stresse térmico nos trabalhadores e, por outro, pela minimização do desconforto térmico na realização das tarefas. Este tema será revisitado na descrição apresentada nos pontos seguintes.

2.2.2.2 Efeitos e consequências nos trabalhadores

O ambiente térmico tem uma vasta e diversificada influência nos seres humanos que a ele se encontram expostos. Diversos autores se têm debruçado sobre o tema, resultando clara a influência desse fator no estado geral de saúde dos trabalhadores e nos seus comportamentos, em matéria de segurança ocupacional e produtividade, conforme adiante se demonstrará. Com efeito, alterações metabólicas e de resposta orgânica ao ambiente, conduzem a efeitos ‘colaterais’ que reduzem as capacidades motoras e cognitivas dos envolvidos, colocando-os numa situação de maior debilidade e risco, o que não é, nem deve ser, negligenciado.

Considerando a importância da segurança ocupacional e da produtividade, enquanto temas centrais a incorporar no modelo de relacionamento com o ambiente térmico a desenvolver no presente trabalho, essas matérias serão objeto de apresentação individualizada e detalhada no ponto 2.2.4. Assim, tais conteúdos não serão aqui relatados, evitando-se a sua duplicação e remetendo-se para o referido ponto os respetivos desenvolvimentos.

Nesse pressuposto, apresenta-se aqui apenas o conjunto de referências sobre a influência do ambiente térmico no estado de saúde dos trabalhadores, na tentativa de descrever e concretizar a multiplicidade de aspetos a considerar nesse plano.

Comece-se por referir que o ambiente térmico local conduz a situações de conforto, desconforto ou stresse térmicos, como se evidenciou na exposição relativa a esses conceitos (ver ponto anterior, 2.2.2.1).

Evidentemente, cada situação têm um impacte diferente no trabalhador, podendo variar entre uma situação desejável (conforto), a outra, intolerável (stresse).

Será nas situações de desconforto e, particularmente, nas de stresse térmico que o organismo será 'pressionado' negativamente, sendo as suas consequências tão mais graves, quanto mais agressivo for o ambiente, em termos de intensidade e/ou duração.

Aparte a severidade das consequências, as doenças motivadas pelo calor são relativamente frequentes nas minas da África do Sul e Austrália, conforme indica Donoghue (2004) e este setor de atividade é referido por Balbus e Malina (2009), no estudo que efetuaram nos Estados Unidos, como integrante do conjunto de indústrias onde os trabalhadores mais sofrem com o calor.

Também sobre o problema do trabalho em ambientes quentes e reportando-se às alterações climáticas na Índia, Dash e Kjellstrom (2011) referem que *'é tempo de reconhecer a importância do stresse térmico como uma questão de saúde pública e conduzir estudos de carácter científico, (...) para formular diretrizes quanto às medidas de segurança a adotar'*.

Nesse sentido, é de indicar que vários autores têm abordado, em termos gerais, os problemas de saúde decorrentes da exposição a ambientes térmicos adversos (quentes), de que são exemplos, a identificação dos aspetos e fatores de risco relacionados (Schulte e Chun 2009), (Bates 2005) (Guedes, Baptista e Diogo 2011), a indicação de perturbações e doenças associadas ao calor (DREC 2000)³⁵, (DeVaul 2008) ou os seus efeitos no trabalhador (Wagner 2001).

Estudos de âmbito mais específico são dirigidos, por exemplo, à identificação dos efeitos do trabalho no ritmo cardíaco de trabalhadores permanentemente expostos ao calor, durante os seus turnos regulares (Gertner 1984); ou apontam as consequências cardiovasculares do impacte térmico e a consequente tolerância do indivíduo ao exercício, em função do vestuário (Fogarty, et al. 2004); ou explicam as características únicas das doenças relacionadas com o calor, na força de trabalho agrícola de origem latino-hispânica, perspetivando uma visão geral dos problemas de hidratação e de exposição ao calor, associados à cultura desta população (Culp, et al. 2011).

Outros estudos incidem sobre a ocorrência deste tipo de problemas em setores ou áreas de atividade específicas, como sejam, a atividade das equipas de emergência (Varley 2004), ou dos bombeiros (Barr, Gregson e Reilly 2010), ou na atividade mineira, onde Gancev (2006) e Donoghue (2005) enumeram o choque térmico, a exaustão térmica, as câibras térmicas e a *'miliária rubra'*, como sendo os problemas de saúde relacionados com o excesso de calor, naquele contexto.

Quanto aos efeitos produzidos nos trabalhadores, Donoghue, Sinclair e Bates (2000) referem as consequências da exaustão térmica. Paralelamente, a análise do risco de

³⁵ Direção Regional de Educação do Centro (DREC): "Ambiente termico", disponível em http://www.prof2000.pt/users/eta/Amb_Termico.htm, acedido a 17 de novembro de 2010.

surgimento desse problema é efetuada, em função do índice de massa corporal (BMI) e do consumo máximo de oxigénio no interior de minas profundas, por Donoghue e Bates (2000a) e em relação às condições térmicas prevalecentes na superfície, em Donoghue e Bates (2000b).

Complementarmente, Sá (1999) lista os tipos de problemas ocasionados pelo stresse térmico e a respetiva sintomatologia produzida nos indivíduos. Essa informação encontra-se sintetizada no quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Consequências do stresse térmico

Designação	Consequências
Choque térmico (Subida continua da temperatura)	<ul style="list-style-type: none"> – Convulsões e alucinações; – Coma (42 – 45°C); – Morte.
Colapso térmico (Aumento acentuado da pressão arterial, incremento do fluxo sanguíneo)	<ul style="list-style-type: none"> – Vertigens, tonturas; – Transpiração muito intensa; – Dores de cabeça fortes.
Desidratação (Perda de água excessiva, taxa de sudção muito elevada)	<ul style="list-style-type: none"> – Diminuição da capacidade mental; – Diminuição da destreza; – Aumento do tempo de reação.
Desmineralização (Perda de sais não compensada, ingestão de água não compensada)	<ul style="list-style-type: none"> – Cãibras térmicas.

Fonte: Sá, Ricardo (1999)

Da observação das consequências indicadas por Sá (1999), ressalta a percepção de que os efeitos são muito diversos, produzindo diferentes níveis de gravidade que, nos casos extremos, se traduzem por convulsões, coma e morte.

Caracterizados os tipos de perturbações orgânicas produzidos pelos ambientes térmicos quentes, segue-se a análise de incidência dessas situações nos ambientes normais de trabalho.

Como anteriormente se mencionou, as doenças associadas ao calor são relativamente frequentes. Já na década de 70, as taxas de mortes e outras doenças associadas á exposição excessiva ao calor foram analisadas por Martinson (1977). Mais recentemente, Donoghue (2004) fez o levantamento dessas situações, nas minas dos EUA, no período compreendido entre 1983 e 2001, durante o qual foram reportados 538 casos e, concluiu, que a taxa de incidência deste problema é maior em minas metálicas subterrâneas³⁶ do que nas de carvão.

Num outro estudo, igualmente aplicado aos EUA, Quinney *et al.* (2002) analisam os acidentes mortais que tiveram como causa queimaduras térmicas, ocorridos nos locais de trabalho entre 1992 e 1999, cujo valor indicam ter atingido o número de 1.189. As

³⁶ Tipo predominante no território nacional.

categorias profissionais com as maiores taxas registadas foram as "ocupações extrativas" (ex.: mineiros, trabalhadores de explosivos) e "transporte e movimentação de materiais" (ex.: motoristas de viaturas pesadas).

Também para quantificar o impacto dos problemas térmicos, Kampmann e Piekarski (2005) apresentam um estudo realizado entre 1995-1999, nas minas de carvão na zona de *Ruhr* (Alemanha), onde indicam que durante esse período, 442 turnos de mineiros foram interrompidos devido a distúrbios relacionados com o calor.

Quanto ao impacto económico das lesões e doenças ocupacionais associadas a esta problemática, Leigh, Waehrer *et al.* (2004) baseando-se nos registos correspondentes ao ano de 1993, analisam os custos desse tipo de ocorrências.

Após identificação e quantificação da incidência do problema, segue-se a descrição das propostas de solução para o obviar.

Inicia-se este excerto da exposição, aludindo às considerações expressas em Hermanus (2002): *“a higiene ocupacional representa na indústria mineira a 1ª e mais importante linha de defesa contra os riscos ambientais na saúde. Face á vasta panóplia de aspetos relacionados com a saúde e segurança nas minas, a contratação de técnicos qualificados, nessa área, deve ser vista como um assunto crítico e crucial para o desempenho da empresa”*, numa clara referência à importância e nível de exigência que o tratamento do problema coloca. Outras medidas de organização e formação são propostas, como sejam:

- A melhoria do estado geral de saúde, através da mudança do estilo de vida, envolvendo formação nas áreas: dieta alimentar, gestão da fadiga, qualidade do sono e equilíbrio entre vida profissional e familiar (Shiftwork training improves bottom line, study finds 2005);
- Na mesma linha da proposta anterior, Crawford *et al.* (2010) indicam que os trabalhadores mais velhos apresentam alterações nas suas capacidades físicas e psicológicas. Essas alterações podem ser moderadas com a prática de exercício físico, intelectual e outros fatores associados ao estilo de vida. A pesquisa sugere que a intervenção na área da saúde ocupacional pode reduzir o risco de pré-reforma do local de trabalho e intervenções de promoção da saúde são vistas como positivas por esses trabalhadores;
- Estabelecimento de um programa para prevenir as doenças nos trabalhadores expostos a temperaturas e humidades elevadas, associadas ao clima de *Abu Dhabi* (UAE)³⁷. Na sua aplicação, em duas empresas que aderiram ao programa, obtiveram-se decréscimos de 79.5% no número de casos registados e de 50% no número de casos graves, segundo relatam Joubert, Thomsen e Harrison (2011), mentores do programa.

Um outro conjunto de medidas para limitar o problema dirigem-se, por exemplo, ao controlo dos parâmetros ambientais dos espaços (temperatura, humidade) (DREC)³⁸ ou à

³⁷ *United Arab Emirates.*

³⁸ “Ambiente termico”, disponível em http://www.prof2000.pt/users/eta/Amb_Termico.htm, acedido a 17 de novembro de 2010.

definição de estratégias de arrefecimento em minas profundas, propostas em Wagner (2001), através da intervenção e controlo dos sistemas de ventilação.

Na proposta de Bates (2005), são conjugados os dois tipos de medidas anteriores (organização/formação e controlo parâmetros ambientais). Segundo este autor, as estratégias para reduzir os efeitos do meio ambiente sobre os trabalhadores são dirigidas às duas vertentes:

1. *Intervenções de engenharia*, para melhorar as condições ambientais e reduzir o stress térmico (ex.: ventilação);
2. *Trabalho segundo protocolos definidos*, com disposições para identificar situações de risco e procedimentos a serem adotados nessas situações, o que pressupõe a prévia formação dos trabalhadores.

Um último grupo de propostas de atuação incide diretamente sobre os trabalhadores, nomeadamente:

- A reposição de fluidos, considerada essencial para um funcionamento metabólico adequado (em condições de exposição a ambientes quentes) e para prevenir doenças provocadas pelo calor (Clapp, et al. 2000). Estes autores reforçam, ainda, que a desidratação normalmente compromete a produtividade e segurança do trabalhador;
- A visão geral, exposta em Culp *et al.* (2011), sobre os problemas de hidratação e de exposição ao calor, associados à cultura da população de origem Latino-Hispânica, em trabalhos agrícolas;
- A importância da hidratação dos trabalhadores, especialmente aqueles que operam em ambientes quentes e a necessidade de novas recomendações de ingestão de líquidos antes, durante e após o trabalho (Kenefick e Sawka 2007);
- A aclimação ao calor melhora a tolerância térmica, o que aumenta a segurança e conforto durante o exercício e diminui as condições que conduzem a stress térmico (Wingo, et al. 2008), (Tian, et al. 2011);
- As características e utilização de vestuário de proteção (Taylor 2006), (Yang, Stapleton, et al. 2012) e a sua repercussão, em termos de termorregulação humana (Magalhães, et al. 2002);
- O efeito da ingestão de bebidas frias (4°C) e termo neutras (37°C) na termorregulação e desempenho humano em ambientes quentes é analisado em Burdon *et al.* (2010). Concluem que o consumo de bebidas frias durante o exercício prolongado ao calor melhora a temperatura corporal e o desempenho, pelo que propõem a utilização de bebidas frias na hidratação, por razões de desempenho e segurança.

Para perceber a situação de equilíbrio ou desequilíbrio térmico dos trabalhadores e, consequentemente, o nível de risco em que eles se encontram, é necessária a medição de parâmetros metabólicos individuais que possibilitem essa análise. Sobre o tipo de avaliações a realizar, são expressas diversas abordagens, destacando-se os seguintes grupos e exemplos:

- A medição do *ritmo cardíaco* foi utilizada:

- ✧ na avaliação do stresse fisiológico em mineiros (Saha, Samanta e Dey 2010);
- ✧ num estudo que envolveu 71 mineiros que operam máquinas com e sem ar condicionado nas cabinas, ficando demonstrados os benefícios do uso de cabinas com ar condicionado (AC), para reduzir os efeitos do microclima quente. Verificou-se que os valores médios de ritmo cardíaco registados são significativamente mais elevados no grupo que opera sem AC (Tuminska, et al. 2010);
- ✧ na determinação simples de um valor seguro para o limite de tempo de exposição (Meyer, et al. 2001);
- A *temperatura corporal* foi medida ou estimada através de:
 - ✧ temperatura da pele, medida em 10 segmentos do corpo (Choi e Loftness 2012);
 - ✧ cálculo da temperatura média da pele (Xu, et al. 2009), valor já anteriormente associado ao critério para limitar o stresse térmico (Stewart e Van Rensburg 1977), em ambientes de minas de ouro, na África do Sul;
 - ✧ temperatura auricular, a utilizar como previsão da temperatura retal e interna (Muir, et al. 2001). O autor indica ter obtido um elevado desvio padrão, sugerindo investigação futura sobre essa correlação, em condições ambientais diversas;
 - ✧ temperatura esofágica e ritmo cardíaco, relacionados com a sensação térmica e taxa de esforço percebida (Kenny 2011);
 - ✧ temperatura interna, através de sensores de temperatura ingeríveis, que comunicam dados para um recetor externo, via ondas de rádio (tecnologia *wireless*) (Mc Caffrey, et al. 2008).
- O *consumo metabólico*: utilizado conjuntamente com o índice de stresse térmico WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*)³⁹ (Kenny, Vierula, et al. 2012);
- A *taxa de evaporação do suor*: como parâmetro base na definição do tempo de trabalho seguro (McLean, et al. 2007) ou;
- A *taxa de recuperação*: baseada numa aplicação real (construção civil, em Hong Kong, durante os meses de julho e agosto) em que essa taxa é avaliada pelo *Physiological Strain Index* (PSI), com o objetivo de determinar o tempo ótimo de recuperação dos trabalhadores expostos ao calor (Chan, et al. 2012).

Dos exemplos expostos, é possível constatar que existem diversos modos de quantificar o ‘estado’ do indivíduo, uns diretos e outros indiretos. Na aplicação prática a desenvolver, será privilegiada a medição direta da temperatura corporal interna, através da ingestão, pelos voluntários, de um sensor de temperatura, do tipo indicado em Mc Caffrey *et al.* (2008). Esta solução permite obter valores reais, sem necessidade de estabelecer correlações ou estimativas que, normalmente, introduzem ‘ruído’ e perda de qualidade nos resultados.

³⁹ Definido analiticamente adiante (equação 2.3).

Para finalizar a exposição deste ponto, sobre os aspetos relacionados com a saúde, referem-se alguns estudos que integram e comparam alguns dos fatores acima enunciados, com o propósito de materializar relações que se possam concretizar em instrumentos de atuação, orientados para a minimização de riscos térmicos nos trabalhadores. Para esse propósito, vejam-se os seguintes exemplos:

- Relação entre a temperatura interna do corpo humano e a incidência de exaustão provocada pela tensão térmica, em pessoas vestindo roupas de proteção, comparando com dados anteriormente publicados e relativos a pessoas nuas (Montain, et al. 1994). Estes autores também determinam a influência da intensidade de exercício, nível de vestuário de proteção e clima, na tolerância fisiológica ao stresse térmico;
- Comparação dos ambientes de trabalho e suas consequências, em termos de problemas de saúde, entre trabalhadores de uma fundição e do setor de produção de bebidas no Dubai (Gomes, Lloyd e Norman 2002);
- Para diferentes situações de exercício, ambiente térmico e vestuário, Cadarette *et al.* (1999) apresentam e comparam os resultados obtidos com três modelos distintos, de previsão da temperatura interna do corpo humano: ARIEM⁴⁰, HSDA⁴¹, e ARIEM-EXP⁴²;
- Comparação entre dois aparelhos de fornecimento de oxigénio (líquido e comprimido) a dez voluntários, que integram as equipas mineiras de emergência. Os autores (Leigh, Griffiths e Ellis 1998) concluíram ser claramente superior e preferível o uso do aparelho de oxigénio líquido, pois melhora a troca evaporativa de calor, baixando significativamente as taxas de incremento da temperatura retal e do ritmo cardíaco;
- Comparação entre os valores e a tendência estatística das doenças ocupacionais entre mineiros chineses e americanos, nos últimos 10 anos (Chen, et al. 2013);
- Identificação dos dados antropométricos de soldados norte americanos, no período compreendido entre 1988 e 2004, considerando que esses aspetos afetam o desempenho e a segurança. O estudo, conduzido por Yokota, Bathalon e Berglund (2008), compara as respostas fisiológicas, numa situação de simulação de stresse térmico, para cada estereótipo de soldados (altos e gordos, baixos e magros,...) e conclui não haver diferenças nos resultados obtidos para cada grupo considerado.

Concluída a descrição das consequências dos ambientes térmicos quentes no estado geral de saúde dos trabalhadores, recorda-se que esse tipo de ambiente também se repercute na produtividade e segurança ocupacionais, o que não foi abordado neste ponto por se ter optado pelo seu tratamento posterior, de forma individualizada e específica, conforme inicialmente mencionado.

⁴⁰ Army Research Institute of Environmental Medicine (ARIEM).

⁴¹ Health Services and Development Agency (HSDA).

⁴² Army Research Institute of Environmental Medicine (ARIEM).

2.2.2.3 Métodos de monitorização e avaliação / Índices

A quantificação das características dos ambientes térmicos existentes nos locais de trabalho e o seu efeito no ser humano têm sido, ao longo do tempo, objeto de diversos estudos. Em Dumka (1989) refere-se, numa perspetiva histórica, que mais de 90 índices de stresse térmico foram desenvolvidos para congregar os diversos fatores intervenientes num valor único, que possa ser usado para prever o nível de stresse térmico resultante da exposição do indivíduo a condições ambientais adversas.

O problema do stresse térmico e da sua quantificação não é recente, sendo referido por Martinson (1977) que esse problema é considerado um perigo endêmico, desde 1924, nalgumas das 42 minas de ouro da zona de *Witwatersrand*, na África do Sul. Outros estudos da mesma época (décadas de 60-70) propõem desenvolvimentos diversos, para melhorar a eficácia e consistência dos resultados a obter pelos índices de “ambiente térmico”. A título de exemplo, indicam-se os seguintes:

- Novos índices: determinação do ambiente térmico usando um índice de stresse fisiológico (Vogt 1966); índice de sensação térmica, em ambientes húmidos, quentes ou frios, baseados num modelo de temperatura da pele (Nishi 1969); os critérios para limitar o stresse térmico, associados à temperatura média da pele (Stewart e Van Rensburg 1977) ou à transferência de calor e limites fisiológicos (Stewart 1980);
- Alteração de índices existentes: nova fórmula estabelecida para o termómetro *wet kata*, em substituição da anterior, que se acreditava ser errada (Lambrechts 1972) ou a consideração de novos fatores relevantes para a avaliação do stresse térmico, o que conduz ao estabelecimento de recomendações para os procedimentos a executar nesse tipo de avaliação (Stewart e Whillier 1979)
- Limites de temperatura seguros: determinados com base nas equações de Mitchell and Whillier, os resultados experimentais estão em concordância com os medidos pelo termómetro *wet kata*, dando-lhe suporte como medidor de stresse térmico (Stewart e Wyndham 1975).
- Proposta de standards: para trabalhos em minas nos Estados Unidos da América, com ambientes quentes e câmaras de refúgio, considerando vários aspetos do problema: refere a natureza da tensão e stresse térmicos e das doenças fisiológicas relacionadas com o calor; fornece informação sobre índices de stresse térmico, fontes de calor e medidas de controlo ambiental no interior das minas (Misaqi, et al. 1976).

Estes exemplos, que constituem estádios pontuais do processo evolutivo (contínuo e não finalizado), evidenciam a preocupação em estabelecer novos índices ou melhorar os existentes, no sentido de se obterem instrumentos que reproduzam a realidade e permitam o controlo efetivo do risco de stresse térmico, bem como a definição de procedimentos a adotar para o evitar.

Ainda sobre índices de stresse térmico Lamberts e Xavier (2002), citando Szokolay e Auliciems (1997), referem como mais importantes, os seguintes:

- Para ambientes quentes: TAR⁴³, P4SR⁴⁴, HSI⁴⁵, WBGT⁴⁶, TSI⁴⁷, RSI⁴⁸, ITS⁴⁹;
- Para ambientes frios: IREQ⁵⁰

os quais foram desenvolvidos e apresentados nas décadas de 40, 50 e 60 (ambientes quentes) e 80 (ambientes frios).

Faz-se aqui um parêntesis para referir que nem todas as minas subterrâneas (alvo do presente estudo) possuem um ambiente térmico quente e húmido, nas quais fará sentido a aplicação de índices desenvolvidos para ambientes frios (ex.: IREQ). Para corroborar esta ideia, vejam-se os estudos de Bandopadhyay *et al.* (1995), aplicados a minas no Ártico, onde abordam os problemas de troca de calor com massas de rocha geladas e, também, de ventilação em espaços com temperaturas muito negativas. Também Hassi *et al.* (2000) relacionam as quedas e escorregamentos ocupacionais com o ambiente térmico frio, na indústria mineira americana, através de informação recolhida durante 6 anos (período de 1985-1990). Numa outra abordagem, Mozaffarieh *et al.* (2010) analisam o desconforto térmico associado a “*extremidades frias*”, em função da idade, sexo e índice de massa corporal, enquanto Holmer (2009) indica que o frio é um risco para a saúde e pode afetar a segurança e o desempenho no trabalho.

Estas referências demonstram que o excesso de frio é tão negativo como o excesso de calor, conduzindo a idênticas preocupações. No entanto, o desenvolvimento subsequente exclui os ambientes frios e irá incidir apenas nos ambientes quentes e húmidos, por serem esses os característicos das explorações mineiras subterrâneas a considerar, no território nacional e no âmbito do presente trabalho.

Retomando a descrição anterior, é de referir que novos estudos complementares têm sido desenvolvidos, mais recentemente, propondo alternativas ou evoluções aos índices atrás mencionados. Exemplos dos progressos mais recentes e atuais desse tipo de instrumentos – sejam diretos (*parâmetros metabólicos*) ou indiretos (*índices*) – são sintetizados a seguir, em separado e por ordem cronológica:

- Os índices ASHRAE SETI, Fanger e Winslow apresentados por Gagge, Fobelets e Berglund (1986), para previsão da resposta humana a ambientes térmicos;
- A adoção do “*Specific Cooling Power Index*” (SCP) como índice de stresse térmico (Dumka 1989), aplicado com sucesso nas minas “*Genmin*”, África do Sul;
- O índice de desconforto modificado (MDI), calculado com base na temperatura ambiente (T_a) e na temperatura de bolbo húmido (T_w), proposto por Moran e Pandolf (1999);
- O índice para análise da sensação de conforto térmico, em ambientes térmicos instáveis (Masuoka, Takatsu e Kohri 2002);

⁴³ TAR – Relação de aceitação térmica (Plummer 1945).

⁴⁴ P4SR – Taxa de suor estimada para 4 horas (McArdle 1947).

⁴⁵ HSI – Índice de stresse por calor (Belding e Hatch 1955)

⁴⁶ WBGT – Índice de bolbo húmido e temperatura de globo (Yaglou e Minard 1957)

⁴⁷ TSI – Índice de tensão térmica (Lee 1958)

⁴⁸ RSI – Índice relativo de tensão (Lee e Henschel 1963)

⁴⁹ ITS – Índice de stresse térmico ou taxa requerida de suor (Givoni 1963)

⁵⁰ IREQ – Índice de isolamento requerido para vestuário (Holmer 1984)

- A comparação entre os dois índices de stresse térmico, WBGT e HSI (*Heat Stress Index*), referida em Taylor (2006);
- O índice TWL (*Thermal Work Limit*), proposto por Bates (s.d.) e Miller e Bates (2007), para aplicação em alternativa ao WBGT, que consideram apresentar resultados muito conservadores;
- O relacionamento entre índices de intensidade de trabalho, de conforto térmico e limites standard, como método de avaliação do grau de risco térmico dos trabalhadores (Zhang, et al. 2007);
- O índice de avaliação do risco associado ao calor, em minas chinesas, baseado no conceito de “*Synthesis-reduced temperature*” (SRT), referido em Su, Jiang e Sun (2009);
- O “*Tsens index*”, desenvolvido por Liu (2010), para prever a sensação térmica num ambiente real, variável, em permanente mutação;
- O “*new index-equivalent temperature*” (ET) para avaliar as condições de stresse térmico em espaços interiores quentes e húmidos, com potencial prático, conforme refere Liang *et al.* (2011).

Outros processos de avaliação envolvem medições de parâmetros fisiológicos, como sejam:

- O balanço de trocas de calor entre a pessoa e o ambiente, com base no cálculo do volume de suor (Nedza 2000) ou a determinação da situação de stresse térmico utilizando o cálculo da “*taxa requerida de suor*” (Swreq), descrita e proposta pelo laboratório Labeee⁵¹;
- O risco de exaustão térmica, em função do índice de massa corporal (BMI) e do consumo máximo de oxigénio ($Vo_{(2)max}$), no interior de minas profundas, analisado em Donoghue e Bates (2000a);
- A temperatura interna do corpo, temperatura da pele, ritmo cardíaco e perda de massa corporal, preconizado pela norma ISO 9886: 2004⁵²;
- A temperatura média da pele e a temperatura de bolbo seco, para estabelecer um diagrama dividido em três zonas (preferível, aceitável e proibida) de análise de risco (Xu, et al. 2009);
- O regime transiente, que considera a alteração da temperatura corporal na simulação das trocas de calor entre o corpo e o ambiente, no trabalho mineiro, através de um modelo matemático de simulação numérica (Waclawik 2010);
- A correlação da temperatura da pele, medida em 10 segmentos do corpo, com a sensação térmica (Choi e Loftness 2012);

Uma nota para relembrar que estes exemplos são relativos ao desenvolvimento de instrumentos para quantificação do conforto ou stresse térmicos (índices) nos seres

⁵¹ “Roteiro Prático para a Determinação da Situação de Stress Térmico Utilizando o Cálculo da Taxa Requerida de Suor (Swreq)”, disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/roteiroSWreq.doc>, acedido em 19 de novembro de 2010).

⁵² “*Ergonomics - Evaluation of thermal strain by physiological measurements.*” Genève: International Standard Organization, 2004.

humanos. Estes são gerais e transversais, ou seja, aplicáveis à generalidade das atividades que envolvem seres humanos e onde possam surgir problemas decorrentes de ambientes térmicos quentes, aparte a maior ou menor dificuldade da sua implementação técnico-económica. Também se fez referência a alguns estudos aplicados a explorações mineiras subterrâneas (objeto do estudo). No entanto, a multiplicidade de aplicações, inseridas nesta temática e descritas na literatura, extravasa largamente esses contextos, podendo referir-se, complementarmente e a título de exemplo, as seguintes:

- Agricultura: a problemática do stresse térmico em trabalhadores de estufas, no sul de Espanha (Callejon-Ferre, et al. 2011) e a sua especial incidência nos meses de verão (Alonso, et al. 2011);
- Edifícios/escritórios: síndrome dos edifícios doentes e análise da situação de conforto/desconforto dos trabalhadores de escritório, em condições de temperatura e humidade altas, em Singapura, por operação deficiente dos sistemas ar condicionado e ventilação mecânica (ACMV) (Chen e Chang 2012);
- Metalomecânica: condições e efeitos do ambiente térmico em empresas do setor de fundição de alumínio (Fogleman, Fakhrzadeh e Bernard 2005) ou a exposição ocupacional ao calor nas operações de fusão, fundição, forjamento e perfuração (Singh, Bhardwaj e Deepak 2010);
- Desporto: análise da situação de exposição ao calor de atletas de escolas americanas (Yard, et al. 2010);
- Equipas de emergência: aborda as condições e efeitos do calor, nas equipas que atuam em situações de emergência, no interior de minas (Varley 2004) ou na atividade dos bombeiros, em geral (McLellan e Selkirk 2006), (Barr, Gregson e Reilly 2010);
- Produção animal: proposta de ajustamento do cálculo do stresse térmico, baseado na temperatura e humidade, através da inclusão da velocidade do ar e da radiação solar, aplicado a explorações de criação de gado (Mader e Davis 2002);

das quais ressalta, mais uma vez, a abrangência do tema.

Paralelamente, outros aspetos de contextualização geral, relacionados com o ambiente térmico, terão de ser também considerados num estudo global do assunto. Nesse sentido, indicam-se os seguintes:

- Situação e perspectivas de evolução: As conjunturas climáticas e instrumentais, atuais e futuras, podem ser percepcionadas nos exemplos seguintes, nomeadamente:
 - ✧ *Climática* - estudos produzidos por Hanna *et al.* (2011), sobre o trabalho exterior, ou interior com deficiente climatização, em ambientes quentes, em função do clima do país, no caso a Austrália. Aqueles autores referem que a importância deste problema é crescente, visto que a temperatura tem vindo a subir e que a ocorrência de dias com temperaturas elevadas, próximas das do corpo humano, é cada vez maior, devido ao aquecimento global do planeta e da frequência de situações extremas. Num outro estudo, baseado numa revisão da literatura científica publicada entre 1988 e 2008, Schulte e Chun (2009) desenvolvem um quadro concetual para identificar como as alterações climáticas afetam o local de trabalho e os

trabalhadores. As alterações climáticas são também referidas e consideradas na caracterização do ambiente térmico em atividades no Japão (Tanaka 2007), no Reino Unido (Youle e Parsons 2009), bem como nas previsões de valores de temperatura expectáveis, no interior de minas polacas (Drenda 2008).

- ✧ *Instrumental* - Águas (2001), Youle e Parsons (2009), ESRU⁵³, DREC⁵⁴, entre outros, apresentam diversos modelos de análise do conforto térmico, enquanto Jay e Kenny (2010) referem a existência de trabalhos em curso, em particular na União Europeia, para desenvolver uma ferramenta (índices) com melhor capacidade preditiva na avaliação de risco de stresse térmico.

Estas referências mostram que as condições térmicas globais são dinâmicas e tendem a agravar-se, assim como realçam a necessidade de evolução dos índices, no sentido de melhorarem a sua precisão. Cabe aqui uma nota para se referir que o presente estudo não abrange a criação de novos índices, prevendo-se sim a utilização de índices atualmente aceites. O processo evolutivo dos mesmos coloca dificuldades acrescidas na seleção daqueles que deverão ser utilizados, remetendo-se para descrição posterior o critério adotado nas suas escolhas;

- Normalização e regulamentação: A avaliação da resposta humana a ambientes térmicos tem sido alvo de grande atenção pela Organização Internacional de Normalização (ISO), através da produção de uma série integrada de normas internacionais sobre o assunto. Elas incluem padrões para aferir o conforto térmico e stresse pelo calor e frio e muitas têm sido adotadas como padrões europeus e britânicos (Parsons 1999). Este autor descreve essa série de normas e, em particular, aquelas que se relacionam com a avaliação de risco em ambientes quentes. Também Markov (s.d.) analisa a normalização relativa ao ambiente térmico, comparando documentos de várias origens (ASHRAE, EN, ISO). Outros estudos integram também referências legais ou normativas no tratamento do tema. Veja-se, a esse propósito, a descrição geral sobre conforto e stresse térmicos, com referência a normas e legislação brasileira (Lamberts e Xavier 2002); a aplicação de metodologias, de acordo com as normas ISO 7730⁵⁵ e ISO 7243⁵⁶, na análise global sobre conforto térmico, proposta por Águas (2001) ou as referências à legislação alemã, no estudo dos aspetos relacionados com o ambiente/stresse térmicos, em minas com 1.400 m de profundidade (Piekarski 1995), entre outros.

⁵³ *Energy Systems Research Unit (ESRU), University of Strathclyde, Scotland: "Thermal comfort models", disponível em http://www.esru.strath.ac.uk/Reference/concepts/thermal_comfort.htm, acedido em 24 de janeiro de 2011.*

⁵⁴ "Ambiente termico", disponível em http://www.prof2000.pt/users/eta/Amb_Termico.htm, acedido a 17 de novembro de 2010.

⁵⁵ "Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and the Specifications of the Conditions for Thermal Comfort." Genève: International Standard Organization, 2005.

⁵⁶ "Hot environments - Estimation of the heat stress on working men based on the WBGT Index (wet bulb globe temperature)." Genève: International Standard Organization, 2003.

É de notar que a normalização e regulamentação existentes, nesta matéria, não devem condicionar a evolução dos instrumentos existentes. Só desse modo será possível obter, por exemplo, índices inovadores, rumo a patamares de desenvolvimento mais evoluídos que, no estrito cumprimento desses padrões, não seriam atingíveis.

No entanto, para o presente estudo - que não abrange o desenvolvimento de índices - o cumprimento do normativo existente pode revelar-se desejável e favorável, porquanto permite a:

- Utilização de métodos e procedimentos padronizados e, por conseguinte, obter resultados comparáveis com os de outros estudos disponíveis;
- Aplicação dos resultados finais obtidos ao contexto empresarial, de acordo com o quadro regulamentar aplicável.

A estratégia adotada no desenvolvimento subsequente do presente estudo, sobre este aspeto, pode sintetizar-se do seguinte modo:

- Nos casos em que a execução do trabalho exija inovação e experimentação, não serão considerados os limites e restrições impostas pela normalização e regulamentação laboral, obviamente salvaguardada a integridade física dos intervenientes (ex.: medição da temperatura corporal interna e consideração desse valor como limite, em substituição do valor máximo, proposto pela norma ISO 7243, para o índice WBGT);
- Nas restantes situações, no que é instrumental e de suporte ao desenvolvimento do trabalho, serão seguidos os limites e procedimentos preconizados pelas normas e/ou regulamentação em vigor (ex.: limites de contaminação ambiental da atmosfera do posto de trabalho ou procedimentos a utilizar na medição dos parâmetros térmicos ou temperatura corporal).

Da observação da globalidade dos exemplos anteriores, poder-se-á apreciar a diversidade de abordagens e aplicações propostas pelos diferentes autores, o que coloca a seguinte questão:

- Como seleccionar os índices de conforto e stresse térmicos a utilizar no presente trabalho?

A resposta a esta questão implica a definição de critérios de selecção que adequem as escolhas aos propósitos a alcançar. Nesse sentido, destacam-se as seguintes características principais pretendidas para os índices a seleccionar: facilidade de utilização e aplicabilidade prática, aceitação e adoção privilegiada pela comunidade científica, boa capacidade preditiva e, nestes casos, a sua integração em normas será também “uma mais-valia”.

Tomando como ponto de partida a última característica focada, começa-se por identificar quais os índices que são adotados pelas normas de “ambiente térmico” mais utilizadas, o que se sintetiza no quadro 2.5, onde também se referem os tipos de ambientes característicos em que aqueles se aplicam.

Seguidamente, analisam-se as descrições referidas na literatura e os exemplos de aplicação destes índices, para avaliar as restantes características enunciadas como relevantes para a selecção.

Quadro 2.5 – Normas e índices de ambiente térmico

Norma ISO	Índice	Aplicação a ambientes
7243 - 1989	WBGT	Extremos
7933 - 2004	TSI ⁵⁷	Extremos
7730 - 2005	PMV e PPD	Moderados

Para o efeito, individualiza-se a exposição para cada tipo de índices, designadamente:

- Conforto térmico:

O modelo de Fanger, que inclui os índices *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), é indicado - na pesquisa sobre modelos determinísticos e empíricos efetuada por Orosa (2009) - como uma referência de partida, na investigação e análise futura sobre conforto térmico. Esses dois índices são relacionados entre si, por Yanqiang *et al.* (2009), em três aplicações em espaços subterrâneos distintos (metro, loja e hotel), enquanto MaoYan, Jiaping e Hideki (2007) propõem uma relação entre a temperatura corporal e o PMV e Orosa e Oliveira (2011) comparam esse índice (PMV) com modelos adaptativos, numa aplicação no interior de edifícios.

O campo de aplicação dos índices de conforto térmico (PMV e PPD) restringe-se a ambientes moderados (ISO 7730: 2005). Alguns autores propõem a extensão da sua aplicação a ambientes mais severos, de que são exemplos: a referência ao PMV para avaliar o conforto térmico, em minas subterrâneas profundas (Long, et al. 2008) ou idêntica avaliação, conjugada com métodos de simulação numérica, para definir a velocidade de admissão do ar (ventilação) que satisfaça os requisitos de arrefecimento (Jielin, et al. 2007);

- Stresse térmico:

O índice WBGT é amplamente utilizado para avaliar a situação de stresse térmico (Moran e Pandolf 1999) em ambientes quentes⁵⁸, sendo igualmente referido, por Tanaka (2007), a sua grande utilização em minas e ambientes fabris. Este último autor preconiza, no mesmo artigo, a utilização mais abrangente do índice WBGT noutras atividades, no Japão, devido à alteração das condições climáticas exteriores, cada vez mais adversas.

Também Nedza (2000) aplica este índice numa exploração de granito, num período de altas temperaturas, no verão; Webber *et al.* (2003) utilizam-no no tratamento do problema de ambiente térmico em minas de grande profundidade (5.000m); enquanto Kalkowsky e Kampmann (2006) empregam-no para analisarem a situação de tensão fisiológica de trabalhadores numa mina de carvão alemã.

Em consonância com a perspetiva de Tanaka (2007), exemplos do uso deste índice de stresse térmico (WBGT), noutros setores de atividade, são descritos em Alonso *et al.* (2011), que o aplicam ao estudo das condições de trabalho em estufas, para avaliar o período do dia e época do ano em que o risco de stresse térmico é mais

⁵⁷ TSI - Índice de Tensão Térmica.

⁵⁸ Tipo de situações que ocorrem no interior das minas.

elevado; em Jay e Kenny (2010), que o utilizam em estudos das condições de trabalho de trabalhadores canadenses, cujos valores comparam com os limites de exposição propostos pela ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*); em Ismail *et al.* (2010), numa aplicação a uma fábrica de produção automóvel para obtenção do valor ótimo de produção que, segundo concluíram, ocorre quando WBGT = 24,5 °C; ou, a aplicação proposta em Yi e Chan (2013), onde é utilizado na otimização dos períodos de trabalho/descanso, a adotar em trabalhadores da construção civil de Hong Kong.

De entre os diversos índices de stresse térmico, o WBGT *index* é o mais utilizado, devido à sua consistência, facilidade de aplicação e por integrar uma referência normativa⁵⁹.

Uma primeira nota, para referir que o índice TSI (ver quadro 2.5), alternativo ao WBGT, integra fatores como a determinação da taxa de suor requerida ou a medição da temperatura retal (ISO 7933: 2004, 8)⁶⁰, pelo que a sua utilização prática está sujeita a fortes restrições e condicionalismos. A esse propósito Nedza (2000), compara os dois tipos de índice e indica ser mais preciso o cálculo do volume de suor, na base do balanço de trocas de calor entre a pessoa e o ambiente, do que o WBGT. No entanto, na sua aplicação, o(a) autor(a) utiliza este último, alegando razões industriais práticas, de onde se pode inferir a maior facilidade de utilização e adequabilidade prática do WBGT, características já anteriormente aludidas e que justificam a sua escolha, segundo esta ótica.

Uma segunda nota, para se apontarem alguns comentários ao índice WBGT. Na realidade, o seu desempenho não está isento de críticas, sendo os seus resultados, por exemplo, considerados muito conservadores por Miller e Bates (2007) ou superiores ao desejável, quando aplicados a mulheres trabalhadoras na indústria metalomecânica pesada, de acordo com Konarska, Soltyński e Marszałek (2000), enquanto Budd (2008) sintetiza as suas principais limitações de aplicação. Trabalhos de aperfeiçoamento sobre este tipo de índices estão em curso, em particular na União Europeia, para se desenvolver uma ferramenta com melhor capacidade preditiva, na avaliação de risco de stresse térmico, segundo referem Jay e Kenny (2010).

Por último, ainda sobre este assunto, referem-se dois estudos que conjugam instrumentos distintos no processo de avaliação do stresse térmico: um estudo de duas fases, proposto por Kenny, Vierula *et al.* (2012), em que previamente se monitorizam as atividades típicas dos mineiros e, numa fase seguinte, posterior, se mede o consumo metabólico de energia, na execução dessas tarefas e, um outro, onde Talaia e Rodrigues (2008) salientam a importância da utilização de índices de stresse térmico no estudo do conforto térmico em ambientes industriais, reforçando, no entanto, a ideia de que para a avaliação de um posto de trabalho não só é importante a determinação do valor do índice, como também o conhecimento da

⁵⁹ ISO 7243: 1989.

⁶⁰ “*Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.*” Genève: International Standard Organization, 2004.

percepção ou sensação térmica dos trabalhadores, propondo a utilização de inquéritos para a sua quantificação.

Em suma, decorre do exposto, que os índices PMV-PPD (conforto térmico) e WBGT (stresse térmico) são, reconhecidamente, os mais utilizados nos respetivos campos de aplicação. Independentemente de existir espaço para as suas evoluções e melhorias, eles constituem referências, em termos de aplicações práticas e como ponto de partida para novas investigações.

É de notar que os índices em causa reúnem a totalidade das características principais anteriormente enunciadas, em termos relativos, que aqui se recapitulam: “facilidade de utilização e aplicabilidade prática”, “aceitação e adoção privilegiada pela comunidade científica”, “boa capacidade preditiva” e “integrados em normas”.

Nesse sentido, a escolha desta “bateria” de índices para eventual aplicação no desenvolvimento futuro do presente trabalho fica justificada, dando-se resposta à questão inicialmente formulada.

A figura 2.4 sintetiza, esquematicamente, a situação final a considerar.

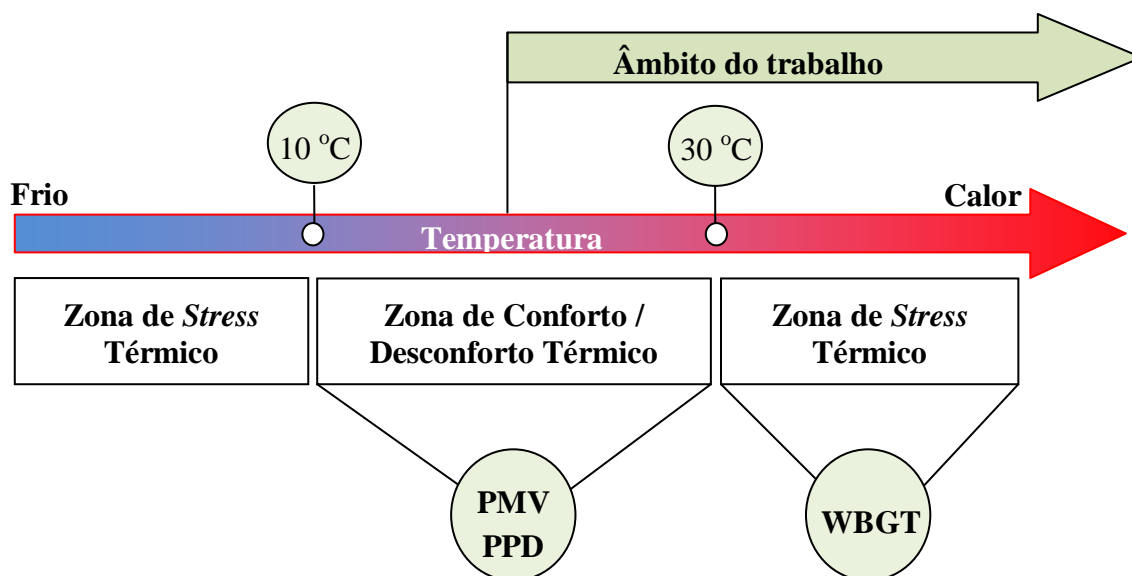


Figura 2.4 – Relação entre temperaturas, zonas de sensações térmicas, índices e âmbito do estudo

Identificados os índices de conforto e stresse térmicos a utilizar, segue-se a sua descrição, com maior detalhe.

Como anteriormente se referiu, a sensação de conforto térmico do indivíduo está relacionada com a manutenção do equilíbrio nas trocas de calor com a envolvente exterior.

No entanto, essa condição de equilíbrio, sendo necessária, não é suficiente, como refere Orosa (2009): o “*conforto térmico é função de vários parâmetros e não apenas de um, como seja a temperatura*”.

Para a quantificação do conforto térmico, Fanger (1970, 1972) foi pioneiro na conceção e apresentação de um modelo⁶¹, que considera a influência das seguintes variáveis:

- Individuais: metabolismo e vestuário;
- Ambientais: temperatura do ar, humidade do ar, velocidade do ar e temperatura média radiante.

as quais são tidas em conta no balanço térmico do corpo humano⁶².

- O índice PMV:

O método desenvolvido por Fanger está na base da determinação do índice PMV, calculado a partir de uma equação de balanço térmico para o corpo humano, em que intervêm os termos de geração interna e de troca de calor com o ambiente circundante. O valor do índice de conforto térmico PMV é uma estimativa da votação média previsível de um painel de avaliadores relativamente a um dado ambiente térmico.

O modelo proposto por Fanger (1972) é focado na análise do relacionamento entre as variáveis que atuam na sensação térmica, estabelecendo uma correlação entre a perceção subjetiva humana - expressa através da votação numa escala de conforto térmico que varia entre -3 (muito frio) e +3 (muito quente) - e a diferença entre o calor gerado e o calor libertado pelo corpo humano, ao qual corresponde a seguinte equação:

$$PMV = (0,303e^{-2,100 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (Eq. 2.1)$$

em que:

- M - Nível de atividade metabólica;
- W - Trabalho mecânico exterior;
- H - Perda de calor sensível;
- E_c - Trocas de calor por evaporação na pele;
- C_{res} - Trocas de calor por convecção na respiração;
- E_{res} - Trocas de calor evaporativas na respiração.

O formulário para o cálculo das variáveis expressas na equação de determinação do índice PMV (equação 2.1) é apresentado, em detalhe, no anexo 2.2.

- O índice PPD:

Um outro índice para análise do conforto térmico é designado por PPD. A norma ISO 7730: 2005, define-o como quantificando “a percentagem prevista de pessoas

⁶¹ Adotado e adaptado na norma ISO 7730: 2005.

⁶² Chan (2008) apresenta a equação de conforto de Fanger como: $f(M, I_{cl}, v, t_r, t_a, P_w) = 0$, em que as variáveis independentes são as que aqui se referem.

insatisfeitas com um dado ambiente térmico”, ou seja, o número de pessoas que se sentem desconfortáveis num ambiente térmico particular.

No mesmo documento é referido que “*um espaço apresenta condições de conforto térmico quando não mais do que 10% dos seus ocupantes se sintam desconfortáveis*”, indicando ainda que “*a quantificação da percentagem de desconforto foi feita através de estudos que envolveram 1300 pessoas.*

Estes estudos permitiram estabelecer uma relação entre o resultado do balanço energético do corpo e a tendência de insatisfação, designada por PPD”.

- Relação PMV e PPD:

Os estudos desenvolvidos por Fanger culminaram no estabelecimento da relação entre os índices PMV e PPD, através da seguinte função:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

cujo gráfico se apresenta na figura 2.5.

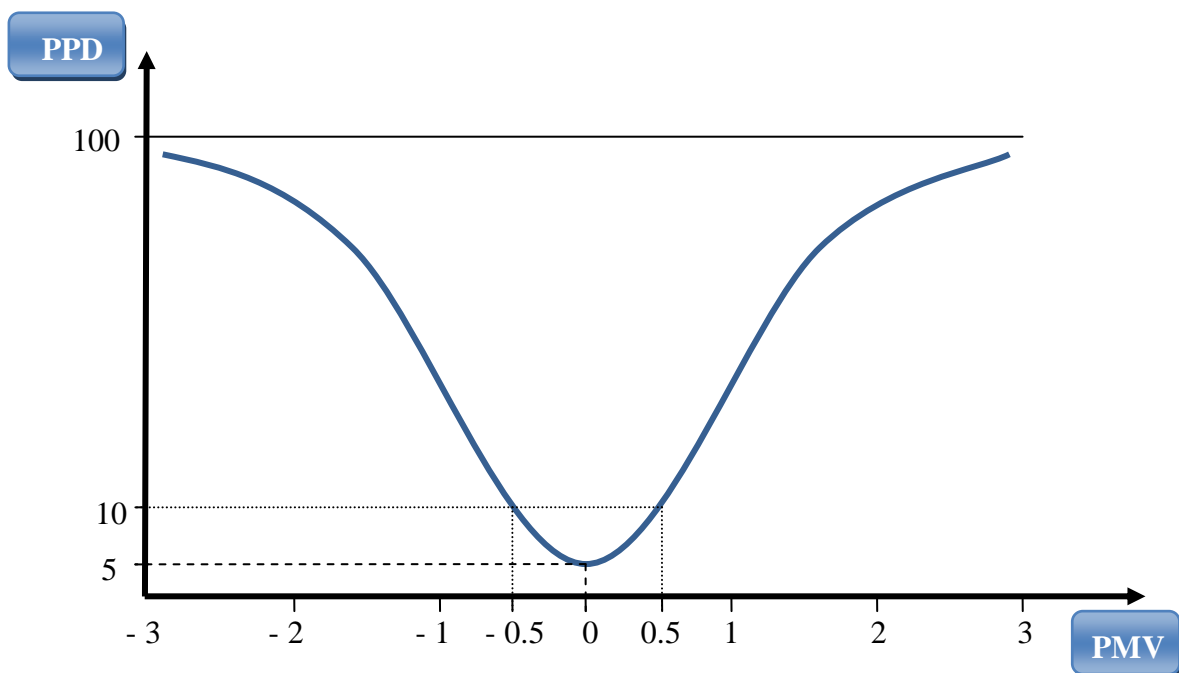


Figura 2.5 - Relação entre os índices PMV e PPD

O gráfico evidencia que ao intervalo de valores compreendido entre -0.5 e 0.5, na escala PMV, corresponde uma percentagem igual ou inferior a 10% de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico (índice PPD), o que se traduz na zona em que se considera que o espaço apresenta condições de conforto térmico.

A aplicação das metodologias e índices referidos permite determinar as condições de conforto (desconforto) térmico, de modo analítico. Porém, a utilização destes instrumentos está condicionada a situações em que as condições ambientais se

consideram moderadas (ver figura 2.4), ou seja, onde as temperaturas do ar se situam entre 10°C e 30°C (ISO 7730: 2005), aparte as extensões de aplicação propostas por Jieliin *et al.* (2007) e Long *et al.* (2008), como anteriormente se referiu.

- O índice WBGT:

Em situações ambientais extremas ou quando por razões técnico-económicas não é viável a determinação dos índices PMV e PPD, é utilizado um outro índice - o *WBGT Index* (ISO 7243: 1989) – recomendado para determinar se um “*ambiente térmico quente é, ou não, seguro*” (Youle e Parsons 2009) ou para “*definir o nível de desconforto do ambiente*” (Águas 2001) para a atividade humana.

Este índice é considerado como um índice de stresse térmico simples, consistente e de aplicação global que, para espaços fechados (sem carga solar), se traduz analiticamente por:

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{bh} + 0,3 t_g \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde:

t_{bh} – temperatura de bolbo húmido (°C), e

t_g – temperatura de globo (°C)

A monitorização deste índice pode ser realizada em locais determinados, através de estações fixas (Moran e Pandolf 1999) ou, em alternativa, com unidades móveis (também designadas por medidores de stresse térmico), transportadas pelos trabalhadores, durante as suas atividades (Cohen 1988), (Wu e Gillies 1997). Estes autores apresentam, como vantagens da segunda opção, a possibilidade de calibrar o medidor para a fisiologia dos trabalhadores, no local de trabalho (Wu e Gillies 1997) permitindo-lhes trabalhar mais perto dos seus limites, em ambientes com temperaturas elevadas (Cohen 1988).

Após realizada a medição - por qualquer um dos processos anteriores - das variáveis ambientais (t_{bh} , t_g) e subsequente determinação do valor do índice (WBGT), este é comparado com os valores limite de referência que se encontram expressos na norma ISO 7243: 1989.

- Valores de referência:

Introduz-se aqui uma nota para referir que os limites indicados não são únicos e universais. Por exemplo, Hancock e Vasmatzidis (1998) realizaram um estudo sobre novos limites para o stresse térmico, considerando a eficiência de desempenho, numa perspetiva comportamental, como o reflexo mais sensível da resposta humana a essa situação. Também McLellan e Selkirk (2006) definem limites de trabalho seguro para os bombeiros, em situação de operação em ambientes quentes e vestindo as suas roupas normais de proteção. Por último, a referência ao trabalho de Singh, Bhardwaj e Deepak (2010), onde comparam os valores obtidos na exposição ao calor, em

operações de enformação metálica (fusão, fundição, forjamento e perfuração) com as recomendações das ACGIH / NIOSH.

No entanto, atualmente e no espaço nacional, o normativo mais utilizado é a ISO 7243: 1989, pelo que é a que se considera como referência, no presente contexto.

Os valores limite aí expressos, para o índice WBGT, dependem dos seguintes fatores:

- ✧ Existência, ou não, de circulação de ar (sensível);
- ✧ Estado de aclimação;
- ✧ Taxa metabólica, associada à atividade desenvolvida.

propondo, também, períodos de trabalho/descanso, de acordo com a severidade das condições térmicas existentes. Estes valores são apresentados no anexo 2.3, em função das 5 classes metabólicas aí definidas (0 – Repouso,..., 4 – Intensa).

De notar que o primeiro aspeto influencia a capacidade de “arrefecimento” do trabalhador; o segundo, a adaptação do organismo ao calor; e o terceiro, a geração interna de calor.

Quanto à adaptação do organismo ao calor, Tian *et al.* (2011) realizaram ensaios de esforço com 11 estudantes saudáveis, simulando atividade de trabalho. Os resultados obtidos mostram que os efeitos da aclimação ao calor são significativos e que o treino de aclimação pode melhorar a adaptação do corpo humano a ambientes quentes extremos. Na redução do risco de hipertermia ou na melhoria de desempenho no trabalho, em ambientes quentes, Taylor (2006) considera como técnicas potenciais para esses efeitos, as seguintes: a adaptação ao calor (aclimação), o impacto fisiológico do uso de roupas de proteção térmica e o arrefecimento do corpo inteiro.

Neste último exemplo, existe a referência a um novo elemento – o vestuário – ao qual já anteriormente se aludiu, aquando da indicação das variáveis individuais, consideradas por Fanger, no modelo de quantificação do conforto térmico. Relativamente à sua influência e características, existem publicados vários estudos, dos quais se indicam alguns exemplos, seguidamente e por ordem cronológica:

- Análise do tipo de vestuário utilizado pelos mineiros, em minas de ouro profundas na África do Sul e a sua relação com as possíveis “penalizações” por stresse térmico, descrita em Murray-Smith (1987);
- O vestuário e a variação de “tensão” térmica, nos mineiros alemães que integram as brigadas de emergência (Kampmann e Bresser 1999);
- A comparação da resistência evaporativa entre dois conjuntos de tecidos anticontaminantes e o seu efeito nas condições de trabalho sustentável, sob condições de stresse por calor (Bernard 1999);
- O uso de roupas impermeáveis para materiais perigosos (HAZMAT⁶³), nas operações de limpeza, pode apresentar um problema de saúde e segurança para o trabalhador, como referem Williamson *et al.* (1999). Mesmo as atividades de limpeza de curta duração podem produzir stresse térmico e lesões nos trabalhadores. Neste tipo de operações, mencionam a hipótese de uso de um sistema de refrigeração interno, para

⁶³ HAZard MATerials (HAZMAT).

aumentar a produtividade do trabalhador e diminuir a probabilidade das consequências negativas apontadas;

- Estudo laboratorial sobre a aplicação de um vestuário arrefecido, que compara com outros dois tipos diferentes, na avaliação da tolerância ao exercício (Kenny 2011);
- Utilização de vestuário arrefecido, proposto por Yang, Stapleton *et al.* (2012);
- Análise laboratorial da influência de 3 tipos de vestuário nas condições fisiológicas da pessoa, em situações de atividade controlada, medindo continuamente ritmo cardíaco, temperatura retal, trocas de calor seco e evaporativo em todo o corpo (Stapleton, et al. 2012);

que permitem perceber a atenção dada a esse fator e, também, a evolução que o mesmo tem tido ao longo dos tempos.

2.2.2.4 Metodologias e métodos de controlo

O tratamento da problemática do ambiente térmico tem sido objeto de diversas abordagens, quer metodológicas, no sentido de equacionarem o problema ou estruturarem a sua análise, quer de aplicações práticas que consubstanciem modos de controlar e limitar o problema. Neste ponto serão dados exemplos de trabalhos que contribuíram para esses propósitos, agrupando-os nas duas seguintes categorias:

- Aspetos metodológicos

Ao nível da estratégia de abordagem do assunto, Malchaire e Mairiaux (1991) propõem como processo de gestão e tratamento do problema de trabalho em ambientes quentes, uma análise em três passos:

- ✧ reconhecimento do problema,
- ✧ avaliação da magnitude do problema,
- ✧ análise profunda da situação (se for caso disso).

referindo as vantagens e possíveis limitações, passo-a-passo, dessa abordagem.

Numa perspetiva de aplicação prática, em S.A. (2002) é estabelecido um quadro de referência para um programa de monitorização efetiva de stresse térmico em minas, incluindo a monitorização de rotinas e ajustamentos. Esse estudo sugere que, no âmbito da gestão do stresse térmico, as temperaturas no local de trabalho devem ser monitorizadas diariamente. Em Ou *et al.* (2005) é apresentado um sistema, que designam por “*fuzzi comprehensive evaluation method*”, em conjunto com *software* específico, para avaliar o ambiente térmico no interior de minas. Outros exemplos de instrumentos metodológicos ou tecnologias podem referir-se neste contexto, como sejam os casos do estabelecimento de um programa informático para determinação do stresse térmico (Onder, Saraç e Eren 2005), o desenvolvimento de um modelo matemático para avaliação do conforto e ambiente térmico, em espaços subterrâneos (Yanqiang, et al. 2009) ou a proposta de um programa de formação sobre toda a problemática envolvida no ambiente térmico (Sá, Azevedo e Tavares 2010).

Numa perspetiva instrumental, Höpfe (1993) apresenta um modelo e equações de balanço térmico, que incorporam todos os modos de transferência de calor entre o

indivíduo e o ambiente, referindo, complementarmente, os valores de taxas metabólicas para diferentes atividades. Um outro contributo sobre este assunto é facultado em Mitchell e Whillier (1999), onde se salienta a importância da velocidade do ar e da temperatura de bolbo húmido na termorregulação humana e, se indicam, os parâmetros a considerar na análise de transferência de calor e balanço térmico, entre o indivíduo e o ambiente.

Também para avaliar o conforto térmico, em minas profundas, Jielin *et al.* (2007) utilizam técnicas de simulação numérica. Analogamente, essa técnica é utilizada no modelo matemático para determinação das trocas de calor entre o corpo e o ambiente, no trabalho mineiro, proposto por Waclawik (2010). Para avaliar o grau de risco térmico, Zhang *et al.* (2007) propõem um método que relaciona índices de intensidade de trabalho, de conforto térmico e os limites *standard*, enquanto Orosa e Oliveira (2011) fazem referência a modelos adaptativos, aplicados a atividades desenvolvidas no interior de edifícios.

- Métodos de atuação e controlo

Similarmente ao referido no ponto precedente, também neste campo surgem diferentes propostas de métodos e formas de atuação, que se dirigem à redução do risco associado aos ambientes térmicos quentes.

As abordagens neste nível são, elas próprias, diversificadas, passando por estratégias de intervenção que incidem sobre o ambiente (ex.: controlo temperatura no interior de minas, através de sistemas de arrefecimento ou ventilação), sobre os indivíduos (ex.: utilização de equipamentos de respiração autónoma ou vestuário arrefecido) ou, simultaneamente, sobre os dois elementos.

Julga-se ser de interesse fazer aqui uma breve referência às causas que tornam os ambientes quentes, visto que as estratégias de controlo e atuação podem, de algum modo, depender da *fonte* em causa. Para concretizar esta ideia, considerem-se os dois fatores seguintes como exemplos de potenciais causas do aumento de temperatura em ambientes subterrâneos:

- ✧ gradiente geotérmico:

Como anteriormente se mencionou, a temperatura tem uma correlação direta e positiva com a profundidade dos espaços subterrâneos, em média de + 3°C por cada 100 metros.

Sobre este aspeto Danko, Mousset-Jones e McPherson (1988) apresentam um estudo específico, no qual analisam a sensibilidade da variação da temperatura, em relação às propriedades termofísicas da rocha, dos coeficientes de transmissão de calor e do grau de humidade em presença.

Complementarmente, também Jones (2003) indica as características que condicionam as temperaturas existentes no interior de minas de ouro profundas, concluindo que as propriedades térmicas da rocha dependem da sua composição, grau de metamorfismo e porosidade;

✧ equipamentos eletromecânicos:

Um grupo de trabalho - que analisou as condições de calor e humidade em minas de carvão inglesas - identificou a incorreta localização de equipamentos, a utilização desnecessária de máquinas, a reutilização de ar ou a excessiva injeção de água, como condições de operação que agravam a produção de calor (Leeming e Fifoot 2001).

As duas fontes de calor indicadas têm géneses distintas e, consequentemente, formas diferenciadas de tratamento: no primeiro caso, o gradiente geotérmico é incontornável, caso se avance em profundidade, o que se constatou ser uma tendência atual comum, quando se analisou o setor de mineiro (ver ponto 2.2.1), não sendo possível eliminar a fonte ou sobre ela atuar, diretamente. Quanto ao segundo caso, relativo aos equipamentos eletromecânicos, as correções a efetuar devem dirigir-se às causas específicas - seja pela tomada de medidas organizativas (localização e utilização de máquinas), seja através de medidas técnicas (alteração da admissão de ar e água) - de modo a minimizar as emissões térmicas dessas fontes de calor. Os exemplos seguintes apontam outras estratégias globais para controlar o risco, como sejam:

- ✧ a identificação das fontes e medidas de controlo do calor no interior de minas, com proposta de valores limite (*standards*) e utilização de câmaras de refúgio (Misaqi, et al. 1976);
- ✧ o estabelecimento dos fatores relevantes e de recomendações para os procedimentos a executar na avaliação do stress térmico (Stewart e Whiller 1979);
- ✧ a discussão das opções possíveis para o efetivo controlo das condições ambientais, baseadas em minas do Reino Unido (Tuck 1997) e das estratégias de arrefecimento, em minas profundas (Wagner 2001);
- ✧ o artigo de S.A. (2005) foca os fatores e medidas que podem ajudar os profissionais das áreas da saúde, segurança e meio ambiente, no sentido de desenvolverem uma abordagem pró-ativa na gestão contra os efeitos do stress térmico nos trabalhadores;
- ✧ a redução do risco de hipertermia ou a melhoria do desempenho no trabalho em ambientes quentes podem ser conseguidas, segundo Taylor (2006), através da atuação em três vetores: vestuário, aclimação e arrefecimento corporal;
- ✧ noutra proposta evidencia-se a importância da avaliação do stress térmico, para a segurança industrial. Para o seu controlo, são preconizadas medidas baseadas na redução do esforço físico, do ritmo de trabalho e do tempo de exposição (Bingham 2009).

Ainda sobre a mesma temática, aplicações de cariz metodológico são descritos nos três exemplos subsequentes:

- ✧ duas estratégias são indicadas em Bates (2005), para reduzir os efeitos do meio ambiente sobre os trabalhadores: “*intervenções de engenharia*”, para melhorar as condições ambientais e reduzir o stress térmico e “*trabalho*

segundo protocolos definidos”, com disposições para identificar situações de risco e os procedimentos a serem adotados em cada caso;

- ✧ em Barr, Gregson e Reilly (2010) aponta-se a necessidade de serem desenvolvidos modelos cognitivos mais sofisticados, para a tomada de decisão pelos bombeiros, num contexto de combate a incêndios, referindo também a importância da hidratação e recuperação pós exposição;
- ✧ também incidindo sobre trabalhadores de equipas de emergência e salvamento nas minas, Moraru, Babut e Babut (2010) preconizam a “*gestão dos protocolos de procedimentos de segurança*”, associados aos desenvolvimentos tecnológicos de componentes eletrónicos, que facultam os meios para melhor medição das condições ambientais e de stresse térmico.

Para finalizar a descrição das propostas de controlo das condições ambientais em espaços subterrâneos - inseridas na estratégia que Bates (2005) designa por “*intervenções de engenharia*” - são de referir as técnicas de refrigeração e ventilação utilizadas para o efeito. Com esse propósito, veja-se a diversidade de propostas técnicas apresentadas sobre o tema, descritas cronologicamente:

- ✧ o cálculo da potência de refrigeração ou a sua estimativa pelo termómetro wet kata, para identificar as necessidades de refrigeração em minas, proposto por Howes (1983). Este autor salienta que é essencial que o método de avaliação do ambiente térmico caracterize adequadamente o stresse térmico, para que o referido cálculo seja representativo;
- ✧ *survey* que estabelece ‘o estado de arte’ relativo aos ganhos em saúde, segurança e produtividade, impulsionados pelos sistemas de ventilação mineira (White 1984);
- ✧ a proposta de utilização do programa *ENVIRON*⁶⁴ (Thomson 1996), que estuda simultaneamente a carga térmica e os requisitos de ventilação em minas. O autor refere ser uma ferramenta eficaz para o planeamento de necessidades futuras de ventilação numa mina ou para prever os efeitos da ventilação, numa qualquer alteração efetuada;
- ✧ a proposta de solução para o problema de ventilação de uma mina de carvão ucraniana (*Donbass*), através de uma abordagem baseada no desenho eficiente do layout dos poços de ventilação natural (Bobrov, et al. 1997);
- ✧ os princípios de engenharia (ventilação e refrigeração) adotadas pela EMP (*Enterprise Mine Project*), para gerir os riscos associados ao trabalho em condições térmicas adversas nas minas de cobre do complexo *Mount Isa*, são discutidos por Brake e Nixon (1998);
- ✧ arrefecimento de ar em minas profundas, através de compressão de ar e introdução de gelo, são as soluções mais económicas para as situações de minas profundas ou ultra profundas, segundo Wagner (2001);

⁶⁴ Designação do programa informático desenvolvido por *Chamber of Mines of South Africa*.

- ✧ programa de cálculo de ‘necessidades’ de ventilação em minas subterrâneas, baseado no método *Hardy-Cross* e adição de rotinas para assegurar a consistência de dados (González 2001);
- ✧ resolução dos problemas de ventilação, através do uso de ferramentas designadas inteligentes (*IITMRULE*⁶⁵ e *ES-VENT*⁶⁶), que os relacionam com os parâmetros ambientais na mina (velocidade do ar, pressão, temperatura, gases, poeiras), numa aplicação na Índia (Bandyopadhyay e Sinha 2002);
- ✧ pesquisa global, apresentada em Chen (2003), sobre a aplicação de sistemas de ventilação, como modo de promover o decréscimo de temperatura, em minas subterrâneas quentes e húmidas;
- ✧ proposta de utilização do designado “*Air Cooling Power*” (ACP), no desenho do sistema de ventilação de minas de grande profundidade (5.000m) (Webber, et al. 2003);
- ✧ levantamento de parâmetros ambientais no interior da mina de crómio mais importante na Turquia, durante um ano, indicado em Dalgic e Karakus (2004). Os autores concluem que a ventilação natural existente é insuficiente para assegurar as desejáveis condições na mina;
- ✧ análise de resultados obtidos pela aplicação de uma nova técnica de avaliação da performance de diversos sistemas de ventilação e arrefecimento, aplicados numa mina de carvão (UK) que apresenta problemas climáticos devido á profundidade e produção altamente mecanizada (Lowndes, Pickering e Twort 2004);
- ✧ apresentação de um software baseado num modelo matemático 3D, para calcular as condições de temperatura subterrânea e otimizar as condições de ventilação (Khokholov e Kurilko 2005);
- ✧ análise do problema do aumento de temperatura em minas de ouro na África do Sul e a necessária evolução dos sistemas de ventilação e refrigeração a utilizar, com indicação de algumas opções técnicas para o resolver: *venturi*, energia e ventiladores hidroelétricos e baterias de refrigeração (Du Plessis, Scott e Moorcroft 2005);
- ✧ garantia de admissão da quantidade de ar requerida, associada à modelização/simulação preditiva da ventilação, utilização variadores de velocidade para controlo ativo e otimização do consumo energético (Webber-Youngman 2005);
- ✧ proposta de atualização dos programas de controlo de ventilação em minas (*MineVent* e *MFIRES*), através de programação orientada para objetos (C++), com o objetivo de aumentar a sua funcionalidade, facilidade de utilização, manutenção e portabilidade, apresentado em Hardy (2006);

⁶⁵ *Indian Institute of Technology, Madras, Rule.*

⁶⁶ *Expert System for Ventilation.*

- ✧ abordagem do problema do desenho do sistema e outros aspetos relacionados com a ventilação, associados ao tipo e quantidade de máquinas (*diesel*) existentes no interior da mina (Rawlins 2006);
- ✧ Zhao *et al.* (2007) analisam a função e eficiência da ventilação como forma de arrefecimento das minas e concluem que a mesma é eficaz. Propõem a sua aplicação alargada a toda a indústria mineira de carvão da China;
- ✧ modelo matemático, proposto em Yang, Ti e Mu (2007), para definição de sistema de ventilação de minas, baseado no *Fuzzy Comprehensive Evaluation Method*;
- ✧ estudo de uma mina de calcário (Baltar, no Brasil) onde Eston, Iramina *et al.* (2000) concluíram que o sistema de ventilação usado na primeira fase da exploração (profundidades até 150m) não é suficiente para o desenvolvimento da mina para os 300m ou mais, devido a problemas de poeiras, quantidade ar fresco e ambiente térmico, considerando necessária a instalação de novos ventiladores principais e secundários. Devido a problemas análogos, Allnutt (2008) propõe soluções de ventilação para instalação na expansão da uma mina, para níveis a cotas de 1000 metros abaixo da superfície;
- ✧ a simulação computacional do ventilador principal, através do software "Ventisim" (*ventilation simulation*) (Gancev 2006) ou a simulação da ventilação e exaustão forçada em minas profundas, com base na "Computational Fluid Dynamics Theory" (CFD), desenvolvida por Long, *et al.* (2008);
- ✧ a análise dos atuais sistemas de arrefecimento (refrigeração e ar condicionado) no interior de minas de carvão polacas, onde o problema é cada vez maior (Szczepan, Obracaj e Borowski 2008);
- ✧ a referência a inovações tecnológicas na área do arrefecimento (*Vortex Tube*) e a sua aplicabilidade a minas subterrâneas (Su, Zhang, *et al.* 2008), (Wang, Gao e Jiao 2009);
- ✧ a influência da composição química do ar seco no sistema de ventilação de uma mina profunda, usando um ventilador principal subterrâneo (Bystron 2010);
- ✧ a reutilização do ar presente no interior da mina (se adequado) para melhorar as condições ambientais existentes e aumentar a eficiência do sistema, quando não há capacidade de ventilação extra (Pritchard 2010);
- ✧ a utilização de sistemas de ventilação auxiliar, em minas de carvão que usam a técnica "Longwall", referidos por Toraño *et al.* (2011).

Os aspetos económicos, associados aos sistemas utilizados (ventilação) para melhorar o ambiente térmico no interior de minas, são cruciais e muito relevantes para esta atividade, devido a constituírem “uma parcela importante dos custos operacionais globais da exploração mineira” (Smith e Arthur 1997). Nesse sentido e complementarmente às referências feitas por Du Plessis, Scott e Moorcroft (2005) ou Webber-Youngman (2005) sobre o assunto, também Hardcastle *et al.* (2005) referem

ser possível obter economias, por exemplo, no consumo de energia elétrica, entre 30 a 90%, dependendo de diversos fatores que enunciam, através da gestão do ciclo de vida de produção da mina.

Paralelamente, Biffi e Stanton (2011) abordam o problema do aumento dos custos de energia e as estratégias para tornar sustentável a operação da indústria mineira. Como solução, integram e preconizam medidas de redução de potência nas alturas de pico, redução de desperdícios e aumento da eficiência dos equipamentos e processos de grande consumo energético, como sejam os ventiladores. Numa outra abordagem, Miao, Cheng e Sui (2007) adotam uma equação de balanço térmico para definir um modelo que garanta condições térmicas adaptadas aos mineiros na China, utilizando o índice “*heat safety index*”, em alternativa ao normalmente utilizado no desenho do sistema de arrefecimento ($t = 26^{\circ}\text{C}$), que satisfaça os requisitos de ‘segurança térmica’ e, também, de economia de energia.

Como se constata, os sistemas de ventilação são o instrumento privilegiado para o controlo do ambiente no interior de minas. A esse propósito e segundo Vutukuri e Lama (s.d.), citado em (Gancev 2006), o papel da ventilação resume-se a:

- ✧ permitir a manutenção de uma quantidade adequada de oxigénio aos trabalhadores;
- ✧ suprimir os gases tóxicos oriundos do desmonte de rochas com explosivos;
- ✧ evitar a formação de misturas explosivas gás-ar;
- ✧ eliminar concentrações de poeiras em suspensão;
- ✧ diluir os gases oriundos da combustão de motores;
- ✧ atenuar a temperatura e a humidade excessiva.

Na apresentação precedente, focou-se a relação da ventilação apenas com o ambiente térmico, por ser esse o objeto de descrição neste ponto. No entanto, a melhoria da qualidade do ar no interior das minas é igualmente conseguida com a utilização daqueles sistemas, cuja eficiência se repercute no maior ou menor nível de contaminação⁶⁷ da atmosfera interna considerada. Esta questão será novamente abordada no ponto seguinte, onde se referirá, com maior detalhe, a sua relação com a ventilação.

Um outro aspeto final a realçar será o facto de a generalidade dos estudos sobre ventilação incidirem nos sistemas designados por principais, com exceção das referências em Eston, Iramina *et al.* (2000) a ventiladores secundários ou em Toraño, *et al.* (2011) a sistemas de ventilação auxiliar. O problema é normalmente abordado considerando as necessidades globais de ventilação, de que resulta a identificação do caudal de ar a introduzir, visando atingir a qualidade desejável no interior da mina. No entanto, essa condição, sendo necessária, não é suficiente para garantir uma atmosfera aceitável em todos os locais interiores de trabalho, sendo essencial reforçar a ventilação em zonas onde a circulação de ar é insuficiente, o que se realiza com recurso aos sistemas de ventilação de atuação localizada, designados por secundários. Esta é a situação de interesse para o presente trabalho, visto que as

⁶⁷ Poeiras, gases.

condições ambientais nas frentes de trabalho são condicionadas pelos sistemas de ventilação secundários, pressupondo-se que a quantidade e qualidade do ar fornecido pelo sistema de ventilação principal é adequada.

Como nota final sobre a problemática do ambiente térmico, poder-se-á afirmar que o tema é vasto e tem sido objeto de diversos estudos, em diferentes vertentes, ao longo do tempo, o que se julga ter ficado bem patente na exposição anterior. Também se referiram os aspetos que sobre este tema se consideram importantes, no âmbito do desenvolvimento deste trabalho, o que será especificamente focado quando se descreverem as metodologias e a aplicação prática, em pontos seguintes.

2.2.3 Outros aspetos ambientais

Em termos ambientais, o aspeto central a considerar no presente trabalho é a análise do ambiente térmico⁶⁸ nos espaços subterrâneos (onde se exerce a atividade mineira) e a sua relação com as questões de produtividade e segurança ocupacionais.

No entanto, uma qualquer aplicação prática sobre o assunto terá também de considerar outros aspetos complementares, igualmente relevantes para a atividade dos trabalhadores. De entre eles destaca-se, neste ponto, a contaminação do ar no interior das minas, referida por Grenier e Hardcastle (1990) como “*incontornável*”. Face à sua importância, são aqui desenvolvidas algumas considerações e apresentado o modo como esse assunto será, posteriormente, integrado no trabalho, na situação de recolha de dados no ambiente mineiro real⁶⁹.

Como ponto de partida, refira-se que a degradação da qualidade do ar no interior de minas provém de diversas fontes:

- Tipo e processos de exploração:

Em minas de carvão, podem referir-se os resultados experimentais publicados por Su *et al.* (2008), onde analisam a concentração de metano e suas variantes, as cargas de pó, o tamanho das partículas, a matéria mineral do pó e outros compostos existentes nos fluxos de ar de ventilação e, também, as considerações sobre os efeitos desse tipo de poeiras na saúde dos trabalhadores (Toraño, et al. 2011). Num outro estudo de caso, desenvolvido por Ogola, Mitullah e Omulo (2002) e aplicado às minas de ouro *Migori*, no Quénia, foram verificados níveis de Hg, Pb e As superiores ao permitido. No mesmo tipo de minas (ouro) e no plano microbiológico, Pohl *et al.* (2007) identificaram a presença de esporos de fungos, em maior concentração nas zonas com um número de pessoas superior e junto a ventiladores de extração.

Estes exemplos permitem perceber que tipos de explorações diferentes colocam riscos de contaminação distintos, quer quanto ao tipo, dimensão e explosividade das partículas em suspensão, quer quanto ao tipo e concentração de gases em presença.

⁶⁸ Problemática amplamente tratada no ponto precedente (2.2.2.).

⁶⁹ Este problema não se coloca na câmara climática.

- Equipamentos:

Conforme refere Rawlins (2006), a qualidade do ar no interior de uma mina é “afetada pelos equipamentos diesel utilizados, os quais aumentam a carga poluente e térmica”. A situação será tão mais nefasta, quanto maior for a quantidade e potência desse tipo de equipamentos, em operação no interior da mina. Este aspeto é ponderado por Von Glehn e Bluhm (2000), na análise das características necessárias do sistema de ventilação, nas zonas de progressão da rampa e exploração da mina, onde existem muitas máquinas, rocha partida, poeiras e que estão longe da tomada de ar fresco exterior. Para controlo da contaminação de partículas e gases emitidos pelos motores *diesel*, utilizados no interior de minas, Miller, Habjan e Park (2007) referem um equipamento prático, simples e portátil para estimar a concentração mássica de carbono elementar à saída do tubo de escape, utilizando fotometria de leitura direta.

Em ambas as situações existe produção contínua de contaminantes atmosféricos durante o processo produtivo, os quais terão de ser controlados, reduzidos e/ou eliminados.

Considerando que a contaminação do ar não é um dos objetos centrais de estudo do presente trabalho, esse aspeto será encarado como um requisito prévio a satisfazer, face à regulamentação e normalização existentes sobre o assunto. Saliente-se que, analogamente ao referido anteriormente para os índices de conforto e stresse térmicos, também nesta área será útil utilizar os padrões existentes, de modo a que a aplicação prática esteja em consonância com as regras estabelecidas para o setor.

Nesse sentido, é de referir que existe legislação nacional específica para o setor mineiro, nomeadamente o Decreto-Lei nº 162/90⁷⁰, que estipula valores limite para a velocidade e caudal de ar, quantidade de oxigénio, temperaturas e concentração de poeiras e de gases nocivos. No que concerne aos valores limite de exposição (VLE) para estes últimos, aquela legislação remete para o cumprimento dos valores propostos na norma NP 1796: 2007⁷¹ sobre essa matéria.

No Decreto-Lei nº 162/90 são também indicados os parâmetros ambientais a medir e a comparar com os valores limite preconizados, de acordo com a tipologia típica das explorações existentes no território nacional.

Os tipos de contaminantes que constam no aludido documento legal são, nomeadamente⁷²:

- Gases: O₂, CO₂, CO, SO₂, NO, N₂O, hidrocarbonetos totais;
- Poeiras: Teor de sílica.

Se os valores medidos para cada tipo de contaminante forem excessivos e não existindo a possibilidade de atuar nas respetivas fontes, haverá lugar a intervenções corretivas ou de proteção, baseadas em diferentes soluções técnicas, como apontam os seguintes estudos:

- ‘Lavagem’ do ar e diluição da concentração de contaminantes:

Proposta de instalação de ventiladores com maior capacidade, na ampliação, em profundidade, de uma mina de calcário brasileira, devido a problemas de poeiras,

⁷⁰ Regulamento Geral de Segurança e Higiene no Trabalho nas Minas e Pedreiras.

⁷¹ “Segurança e Saúde do Trabalho - Valores limite de exposição profissional a agentes químicos”.

⁷² Em consonância com os listados em Gancev (2006).

quantidade ar fresco e ambiente térmico (Eston, Iramina, et al. 2000); ou a descrição dos critérios normais de projeto, realizada em Howes (2005), para avaliar a ventilação e refrigeração quanto aos requisitos, em termos de velocidade do ar, poeiras, gases, diluição de gases de escape de motores *diesel* e stresse térmico, de acordo com os limites legais e código de boas práticas; ou ainda, a integração dos parâmetros de contaminação ambiental (gases e poeiras), entre outros, nas ferramentas “inteligentes” (*IITMRULE*⁷³ e *ES-VENT*⁷⁴) utilizadas para a resolução dos problemas de ventilação em minas indianas (Bandyopadhyay e Sinha 2002);

- **Medidas de proteção:**

Indicação da necessidade de utilizar equipamentos de proteção individual (EPI), em minas de ouro quenianas, onde se verificaram concentrações de metais acima do permitido, com efeitos nefastos na saúde (Ogola, Mitullah e Omulo 2002); ou a utilização de aparelhos de respiração autónoma (ARA), em equipas de emergência (Varley 2004).

Nestes estudos são focados os dois principais grupos de medidas de atuação para controlo ou minimização dos efeitos da contaminação ambiental. Este assunto será revisitado em capítulos seguintes.

2.2.4 Produtividade e segurança ocupacionais

Neste ponto, será descrita a relação dos ambientes térmicos quentes com a produtividade e segurança ocupacionais, *lato sensu*, tentando abranger todos os aspetos relevantes dessa interação, de acordo com a informação atual disponível. Propõe-se uma exposição detalhada, de modo a evidenciar as particularidades desses dois temas, no contexto das atividades mineiras subterrâneas, considerando que eles são elementos centrais a analisar no presente trabalho.

A estratégia seguida na exposição é análoga à adotada nos pontos precedentes, a qual consiste na divisão dos temas em grupos e tópicos, expostos separadamente, para maior clareza na apresentação dos conteúdos.

Inicia-se a narrativa com um enquadramento histórico-legal, para contextualização da situação.

A exploração mineira é identificada como uma atividade milenar, executada de acordo com procedimentos de segurança, não estruturados, que sempre existiram nas atividades realizadas pelo homem. Esses procedimentos foram sendo plasmados nos normativos avulsos e parcelares, estabelecidos ao longo dos tempos, versando a segurança, higiene e saúde no trabalho (SHST). A prioridade atribuída à regulamentação aplicada à indústria extrativa, nesses domínios, surgiu face às suas especificidades de risco elevado.

No entanto, em Portugal, só em 1985 surge o primeiro Regulamento Geral de Segurança e Higiene no Trabalho nas Minas e Pedreiras (Decreto-Lei nº. 18/85), o qual, apesar de tudo,

⁷³ *Indian Institute of Technology, Madras, Rule.*

⁷⁴ *Expert System for Ventilation.*

é pioneiro na sistematização das normas de SHST, no plano nacional. Esse Regulamento sofreu alterações pelo Decreto-Lei nº. 162/90 que, para além de outros objetivos, permitiram incorporar as disposições comunitárias sobre a matéria, na sequência do processo de harmonização pretendido para o espaço comunitário, que Portugal integrou.

É, pois, bastante recente a regulamentação de SHST existente no sector, por comparação com a longevidade da atividade real desenvolvida.

Os efeitos da legislação de segurança em minas, ao nível da produtividade e custos de produção, foram evidenciados por Straton (1972), apreciando a legislação federal americana, no início da década de 70, enquanto Nieto e Duerksen (2008) apontam a legislação, como um fator impulsionador de melhorias tecnológicas que conduzem ao aumento da segurança de operação.

De acordo com o estudo conduzido por Shi (2009), no período de 1995 a 2006 e aplicado a minas de carvão chinesas, a regulamentação de segurança diminui a frequência de acidentes, mas não a taxa de mortalidade. No mesmo sentido, Zhai e Li (2007) referem o sucesso de aplicação de medidas impostas pelo governo chinês, no sentido de melhorar a segurança de minas de carvão de pequena dimensão. Também Tan *et al.* (2010) utilizam um modelo de variáveis fictícias múltiplas (*dummy*), na análise da influência de três leis nas taxas de acidentes relativas ao setor mineiro, desde 1990.

Em contraponto, Sharpe (2011) enfatiza a necessidade de lançar um estudo sobre se os regulamentos existentes têm impacto positivo na segurança de operação das minas nos EUA. De acordo com o autor, os mineiros e profissionais de saúde duvidam do potencial de melhoria da segurança nas minas, pela via do estrito cumprimento da regulamentação. Ele observa que, a uma aplicação mais rigorosa da regulamentação, não está associada a redução do número de acidentes e mortes, com base em dados do *Mine Safety and Health Administration* (MSHA).

A existência de um adequado quadro legal, por si só, não resolve, nem elimina, todos os problemas. Se assim fosse, a vasta investigação sobre estes temas, que subsiste nos tempos presentes e da qual se dará nota a seguir, não teria justificação ou sentido.

Uma outra consideração prévia, neste ponto, prende-se com a importância do ambiente térmico nos seres humanos. É de notar que a exposição a diferentes ambientes térmicos gera respostas psicofisiológicas distintas. Porém, dentro de certos intervalos de temperatura e humidade ($T_a < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $H_r < 60\%$), a simples exposição não produz efeitos adversos, de acordo com Rodrigues, Guedes e Baptista (2011). A questão coloca-se, pois, para valores dos parâmetros ambientais superiores aos indicados e/ou associados à realização de atividades físicas. Conforme notam Bobko e Chernyuk (2008), o aumento da temperatura do ar, diminui a qualidade do desempenho e propicia a adoção de comportamentos de risco.

Essa influência é determinante, quer no plano individual, quer para a performance da empresa onde trabalham, aparte as questões relacionadas com a saúde, já abordadas anteriormente. A produtividade é, aliás, um dos fatores mais importantes, para qualquer organização que opere num contexto de mercado concorrencial, sendo transversal a pequenas e grandes empresas, conforme salientam Niemela *et al.* (2002). Pode, pois,

deduzir-se que os aspetos de produtividade e segurança são de interesse geral e, fundamentais para a permanência das empresas no mercado, dedução legitimada pela ideia-chave expressa por Logsdon (2009): “*Investimentos em segurança são bons como o ouro ... as empresas mineiras que não tiverem isso em consideração provavelmente cairão*”. Portanto, a abordagem individualizada e detalhada desses aspetos - que se seguirá, no desenvolvimento deste ponto - tem toda a utilidade e justificação.

Após estas considerações iniciais, analise-se a dimensão e evolução do ‘problema’ de segurança no setor, referindo alguma informação publicada sobre o assunto, nomeadamente:

- No período 1995 a 2006, ocorreram 4.000 acidentes mortais/ano, nas minas de carvão chinesas (Shi 2009). Em termos relativos, os acidentes mortais nesse país foram reduzidos em cerca de 57%, quando comparados com os ocorridos nos primeiros tempos, após a fundação da Republica Popular da China (1949), segundo indica Jia (1984). Também na China, Li *et al.* (2004) registaram a ocorrência de 293 acidentes, ocorridos entre 1983 e 2002, numa mina de carvão, em *Hunan*, enquanto Zhang *et al.* (2011) apresentam o número de acidentes mortais, no período entre 2001-2008, nos setores de transportes, explosões mineiras e transportes marítimos;
- Nos EUA, Kecojevic e Nor (2009) referem a ocorrência de 69 mortes, em acidentes de trabalho em minas subterrâneas, no período compreendido entre 1995 e 2007, de acordo com os dados da MSHA, enquanto Hendryx e Ahern (2009) analisam a taxa de mortalidade associada à indústria de extração de carvão, na região de *Appalachian*, entre 1979 e 2005;
- A evolução de acidentes e desastres⁷⁵ é avaliada numa série temporal longa (de 1900 em diante), em vários tipos de minas (ouro, diamantes, carvão) na Africa do Sul (Leger 1991), resultando na indicação de taxas de evolução e no estabelecimento de comparações entre os países com maiores produções;
- Num outro estudo, conduzido por Sanmiquel *et al.* (2010), em Espanha, é analisada a taxa de acidentes de trabalho (graves e mortais), no sector mineiro, relativas ao período de 1982 a 2006, durante o qual foram registados 212 acidentes daquele tipo;
- Resenha estatística (frequência, causas, consequências, partes do corpo atingidas) de acidentes ocorridos numa mina iraniana, entre 2001- 2006 (Sereshki, Ataei e Jamshidi 2008);
- Numa perspetiva qualitativa, Ribeiro (2010) refere que os efeitos adversos do calor não geram dor, nem sensíveis limitações, pelo que os trabalhadores tendem a ignorar os primeiros sintomas desse tipo de patologia, o que, aliado à sua persistência nos locais de trabalho, coloca em risco a sua segurança e saúde.

Em geral, as referidas taxas e valores absolutos de ocorrências são consideradas elevadas, pelos autores dos estudos. Nesse sentido, são apontadas as múltiplas causas e fatores que aqueles consideram estar na base desse quadro negativo, a saber:

- Para Sanmiquel *et al.* (2010), a elevada taxa acidentes deve-se a uma fraca gestão da prevenção nas empresas do sector;

⁷⁵ O autor designa por desastre os acidentes que envolvem um número de mortes igual ou superior a 6.

- Na mesma perspetiva, Zhang *et al.* (2007) identificaram 12 principais deficiências organizacionais e 24 comportamentos de risco, na observação dos 1433 maiores acidentes ocorridos em minas chinesas;
- Os acidentes de trabalho mortais são relacionados com os tipos de equipamentos utilizados nas minas subterrâneas por Kecojevic e Nor (2009);
- O estudo sobre a sinistralidade associada ao uso de explosivos, em minas (Xu e Chen 2003);
- A prevalência do uso de álcool e drogas nos locais de trabalho remotos e o seu efeito na “qualidade de trabalho” (Barton 2002);
- O aumento de probabilidade de derrocadas e acidentes com o acréscimo de profundidade (Leger 1991);
- A relação entre os acidentes ocorridos (mina de *Hunan*) e fatores como a idade, anos de trabalho e nível cultural (Li, et al. 2004).

Analogamente dirigidos à identificação de fatores, causas e realidades, mencionam-se alguns exemplos de estudos comparativos entre dimensões, tipos de minas e países:

- Em Sari, Karpuz e Selcuk (2001) é estabelecida a comparação entre os índices de frequência de acidentes (mortais e não mortais) de indústrias de vários países, com os de minas públicas e privadas na Turquia. Também Ural e Demirkol (2008) apresentam um estudo estatístico, no mesmo sentido, sobre acidentes laborais na indústria extrativa turca e a sua comparação com a realidade dos países maiores produtores do setor. Concluem os autores do primeiro estudo indicado que aquelas minas de carvão apresentam um nível de risco mais elevado que as dos outros países estudados;
- Outra abordagem, proposta por Grayson (2001), baseia-se na análise de acidentes em minas subterrâneas de carvão norte americanas, durante o ano de 1996, relacionando-os com a produtividade e níveis de gravidade das suas consequências, concluindo que, em geral, quanto maior é a dimensão da mina, maior a sua produtividade (tons/trabalhador.hora), mas também mais severos são os acidentes;
- Na análise do confronto entre as realidades chinesa e americana, na atividade mineira, Feng e Chen (2013) sustentam que, se o estágio de desenvolvimento for medido apenas pela produtividade laboral, então a China necessita de, no mínimo 30 anos, para atingir o nível de segurança na produção existente nos EUA.

Uma primeira nota sobre os dados indicados, relativos aos acidentes de trabalho: os diversos estudos indicam valores absolutos e taxas globais (ex.: incidência, evolução), não sendo possível desagregar as parcelas que eventualmente correspondam às ocorrências causadas pelo ambiente térmico. Nesse sentido, essa ‘fotografia’ da realidade, bem como da sua evolução, apenas nos permite obter uma perceção geral da situação no setor mineiro, o que, sendo importante, não acrescenta ‘valor’, no âmbito específico do objetivo deste trabalho. Poder-se-á inferir, com base nesses dados, que existe um défice de investigação dirigida à quantificação dos efeitos do ambiente térmico na segurança, o que suscita a necessidade de suprir essa lacuna, no futuro.

Uma segunda nota relativa ao tipo de exploração onde existe maior profusão de referências: as minas de carvão. Tal facto deve-se, certamente, por serem identificadas

como as de “*maior risco*” (Sari, Karpuz e Selcuk 2001), quando comparadas com as demais (ex.: minas metálicas). Sobre o assunto, Saleh e Cummings (2011) indicam, em termos gerais, que “*a mineração continua a ser uma das profissões mais perigosas em todo o mundo e as minas de carvão subterrâneas são especialmente conhecidas pelas suas altas taxas de acidentes.*” Sobre a gravidade dos acidentes, em termos relativos, Coleman e Kerkerling (2007) obtiveram resultados que mostram que a probabilidade de uma lesão ter 10 ou mais dias de trabalho perdidos é de 0,52, para os casos de minas de carvão e de 0,35, para as minas de metal / metaloide, o que reforça a ideia inicial.

Com efeito, a exploração das referências supra, permite verificar que os estudos que incidem sobre o subsetor ‘carvão’ são, no conjunto, claramente predominantes.

Complementarmente, o tratamento de aspetos específicos de segurança, em minas de carvão, têm sido objeto de grande dinâmica de investigação. Para sustentar esta afirmação, indicam-se alguns exemplos, em três grandes áreas singulares desse tipo de minas:

- Segurança estrutural e de pilares: (Sahay, et al. 2004), (Panigrahi e Bhattacharjee 2004), (Zhang, Sheng e Zhang 2002), (Serata, Gardner e Preston 1986) (Peacock 1986), (Jia 1984);
- Combustão espontânea e explosões: (Zhang, et al. 2011), (Maher 2011), (Saleh e Cummings 2011), (Xie, et al. 2011), (Sun, et al. 2009), (Li, Lu, et al. 2005), (Li, Uchino e Inoue 2005), (Sahay, et al. 2004), (Dubinski 2000), (Flores 1998), (Jiang, et al. 1996);
- Inalação pó de carvão: (Houtven, et al. 2010), (Esterhuizen e Gürtunca 2006).

Note-se que este tipo de minas não é predominante no nosso país, pelo que não serão objeto de estudo. Os anteriores exemplos servem apenas para ilustrar a quantidade e tipologia de trabalhos publicados nessa área, não se produzindo desenvolvimentos ou descrições detalhadas acerca dos mesmos.

Retomando as questões transversais de segurança no setor, segue-se a referência a diversas outras causas e às medidas propostas para promover o aumento da segurança de operação, em complemento às já apresentadas:

- Considerações relativas a segurança de equipamentos, gestão científica de riscos, formação e treino do *staff*, bem como o conceito/filosofia “*safety first*” serão essenciais no desempenho de segurança das empresas, de acordo com Jia (1984);
- O trabalho de Feng (2002) aborda os aspetos que considera afetarem a segurança (ex.: espaço, luminosidade, ruído, vibrações, poluição ambiental,...) e sugere medidas de gestão para reforçar a segurança e diminuir acidentes;
- Na pesquisa aplicada a minas de carvão sérvias, apresentada em Dragosavuevic, Ivkovic e Miljanovic (2010), é analisado o impacto dos equipamentos de escavação utilizados naquelas minas, nos ferimentos dos trabalhadores mineiros;
- Em Baker, Heiler e Ferguson (2003) é analisado o absentismo e a taxa de frequência de acidentes, em função de 3 tipos de duração (horas/dia) e extensão (dias/semana) dos turnos, em 3 setores de uma mina de carvão australiana, concluindo que existiram alterações apenas no setor de manutenção;

- As características psicológicas dos mineiros e a sua influência no grau de segurança são quantificados por Liu e Zhang (2011), propondo medidas de melhoria;
- A inexistência de um departamento de segurança é apontada por Cavender (2003) como um modo de responsabilizar todos pela segurança. Segundo o autor, a introdução desta filosofia, em minas de cobre no Arizona (EUA), permitiu reduzir em 88% a taxa de incidentes, atribuindo ao tradicional departamento de segurança o papel de assegurar apenas funções de formação, intervenção em litígios e o relacionamento com o exterior;
- A melhoria da segurança e produtividade através da execução de um programa de garantia de qualidade na gestão (responsabilidade, autoridade e delegação) (Szwedzicki 2003), pela mudança de cultura organizacional (Potts, Smith e Hylko 2003) ou, curiosamente, pela criatividade (Edwards e Sproull 1984);
- A realização de programas de gestão de formação, em duas minas, demonstraram que a segurança e produtividade aumentaram, por comparação com outras minas em que os mesmos não foram aplicados, num estudo com duração de 42 meses, conduzido por Fiedler *et al.* (1984);
- Em Peters (2002) é proposta uma preparação de treino em segurança de novos mineiros, que substituirão os mineiros experientes que vão saindo da atividade (por aposentação);
- As orientações a serem seguidas por pessoas que obrigatoriamente enfrentam condições de calor excessivo, nomeadamente as equipas de socorro, que têm de aceder a locais com essas características (ex. indústria mineira sul africana) são descritas em Kielblock e Schutte (1998);
- A perspectiva feminina sobre a investigação de acidentes ocorridos, baseada nos relatórios existentes, é abordada por Sauer (1992). A autora evidencia que alguma informação silencia o sofrimento humano e exclui o conhecimento experienciado pelas mulheres, fatores que, se tidos em conta, poderiam contribuir para ‘salvar vidas’;
- Os riscos elétricos, associados à utilização do processo de soldadura por arco elétrico, não têm sido, segundo Homce e Cawley (2011), devidamente considerados na indústria mineira. No entanto, os registos da MSHA, para o período entre 1990 e 2001, indicam 836 lesões devidas a queimaduras originadas por arco elétrico, o que o torna numa das causas mais comuns de lesões de origem elétrica nas minas.

São ainda de referir alguns modelos, instrumentos ou ‘novas’ tecnologias, cuja utilização tem sido crescente, em várias perspetivas, quer como auxílio na medição da realidade, quer na intervenção para a melhoria da segurança e/ou produtividade existentes. Nessa direção, vejam-se os seguintes exemplos:

- A dinâmica de sistemas, como método de simulação a utilizar no controlo de riscos de segurança (Bhattacharjee, Mukherjee e Ghosh 1997); na pesquisa de taxas de acidentes e seus fatores, no setor mineiro chinês (Sun e Li 2007); na análise das causas de acidentes em minas de carvão, em substituição das análises tradicionais (Li, Song e Meng 2009); ou para produzir de um modo mais seguro, combinando

investimentos em segurança razoáveis, baixa taxa de acidentes e benefícios económicos de segurança (Zhou, et al. 2009);

- Aplicação do método designado por ‘*grey prediction*’ (Cheng, et al. 2007), para preverem a tendência de ocorrência de acidentes graves, em anos seguintes, nas minas localizadas na província chinesa de *Shandong*;
- A utilização de um modelo logarítmico, que relaciona a escala e a frequência de mortes nos desastres em minas, na prevenção desse tipo de ocorrências (Liu, Wang e Yuan 2010);
- Os métodos de trabalho convencionais e mecanizados e os seus efeitos na segurança e produtividade (Sari, Duzgun, et al. 2004). Os autores concluem que a mecanização melhora ambas, mas mais a produtividade do que a segurança;
- Um modelo que relaciona as condições de trabalho (condições de higiene, ergonómicas, exigências do posto de trabalho, sintomas físicos, entre outros), com os acidentes de trabalho, em Espanha (García-Herrero, et al. 2012);
- Apresentação comercial de um sistema de gestão integrada de informação, recolhida por sensores, que permite atuação em tempo real (CSIRO 2009);
- Em Walker (2010) é enfatizada a importância das comunicações (telefone e rádio) na segurança, produtividade e gestão da atividade mineira;
- A melhoria da segurança através da gestão da frota, com recurso a algoritmos, plataformas e sistemas de informação em rede (Nix 2008) ou através de algoritmos avançados e gráficos inteligentes, para estabelecimento de uma plataforma para automação de futuros equipamentos (Carter 2010a);
- Os efeitos na produção e segurança, pela introdução de novos sistemas eletrónicos nas minas de carvão sul-africanas (Kock e Oberholzer 1997);
- A utilização de robótica para telecomando de veículos de rodas, testada num equipamento de 38 ton, para melhoria da segurança e produtividade (Larsson, Broxvall e Saffiotti 2010);
- A complexidade das tarefas e a natureza inovadora das novas tecnologias, coloca desafios quanto à formação, treino e segurança dos trabalhadores (Travis, Young e Dionisio 2001). Para a formação e treino em segurança na indústria mineira, é preconizada, por Carter (2009), a utilização de tecnologias disponíveis em plataformas *on-line* (*internet*) e a *software* de simulação.

Por fim, a explanação das várias métricas utilizadas na medição de segurança, questão de especial importância para o modelo a desenvolver. As referências disponíveis, nesta matéria, consistem em:

- Análise de riscos e de acidentes em minas, através da contabilização de dias perdidos (Kukic, Ikanovic e Kudumovic 2009);
- Análise da alteração da taxa "*Total Factor Productivity*"⁷⁶ (TFP), que referem ser um método inovador para avaliar a eficiência das condições de segurança, em minas de carvão (Shi e Gao 2010);

⁷⁶ Variável que mede o impacto económico, no longo prazo, de alterações tecnológicas e outras, que não os *input* tradicionais (capital e trabalho).

- Estudo, conduzido por Houtven *et al.* (2010), que estima os custos de cuidados médicos relativos a doenças respiratórias, em trabalhadores de minas de carvão nos EUA, baseados em dados de seguradoras. Concluem pela eficácia económica da prevenção/proteção dos trabalhadores, para evitar inalação de poeiras de carvão;
- Avaliação e comparação do desempenho em segurança de empresas de construção, utilizando a taxa *Experience Modification Rate* (EMR) (Hoonakker, et al. 2005);
- Medição do risco e tendência de ocorrência de acidentes relacionados com o posto de trabalho, ocorridos entre 2001 e 2005, num estudo efetuado numa mina do Irão, através da utilização de taxas de incidência e média de dias perdidos (Vazirinejad e Esmaeili 2009);
- Escolha de um ‘denominador’ para as taxas de acidentes de trabalho (taxa média, anual, rácio/nível), aplicado a 6 níveis de desenvolvimento de uma mina de minério de ferro, na Suécia (Blank, et al. 1998);
- Quantidade de dias perdidos, como métrica alternativa à utilização do indicador taxa de incidência, na avaliação da segurança no trabalho (Coleman e Kerkerling 2007). No período estudado (1983-2004), houve 31.515.368 dias perdidos nos EUA, o que equivale a uma perda anual correspondente a 5.700 trabalhadores.ano.

Como curiosidade, refira-se uma ‘métrica’ desprovida de interesse prático, mas reveladora do nível de risco e gravidade que enfrentam os trabalhadores na atividade mineira subterrânea. Tomando por base registos desde 1900, Leger (1991) sintetiza a situação, na época, com a seguinte afirmação: “*A miner who spends twenty years working underground faces a one in thirty chance of dying in an occupational accident*”.

Finalizada a exposição relativa à segurança ocupacional, sucede-se a apresentação do conjunto de referências relativas ao outro tópico a tratar neste ponto: a produtividade.

Também neste caso, a diversidade de abordagens é vasta: a produtividade é tratada pelos vários autores em diferentes óticas, das quais se irão destacar inicialmente as que se focam nos equipamentos, nas medidas de organização e gestão e nas formas de a mensurar para, posteriormente, se referirem as que se relacionam com o ambiente térmico e segurança. Para cada uma dessas vertentes, indicam-se alguns exemplos, iniciando-se pelas condicionantes tecnológicas (equipamentos):

- Em Walker (2012) são descritas as características de novas escavadoras *Komatsu*, nas quais o fabricante anuncia ter utilizado, na sua produção, componentes e tecnologias de última geração, que lhe permitem alta capacidade de operação, baixos níveis de ruído e consumo de combustível reduzido, melhorando o desempenho. Sobre camiões de transporte de carga (*dumpers*), Carter (2010b) salienta o aumento da produtividade conseguido pela utilização de novas rodas, disponibilizadas pelos fabricantes de equipamentos, para facilitar as suas substituições e reduzir os tempos de reparação. Ainda nesta área, Callow (2006) analisa o efeito das condições da mina, na degradação de componentes dos equipamentos e a sua repercussão negativa nos custos de manutenção, com a correspondente diminuição de produtividade;
- Também para aumentar a produção, Srivastava e Mehra (1999) referem a ampliação de rampas, para possibilitar a circulação de *dumpers* de maior capacidade, conjuntamente com a instalação de um sistema de gestão integrada na mina, que

contempla o plano e controlo de produção (PPC) e o sistema de gestão de equipamentos (EMS) para uma operação mais eficiente;

- Em Carter (2011) é analisada a tecnologia de tapetes transportadores e a sua influência na produção da mina;
- A adoção de novas tecnologias é um elemento que favorece o aumento da produtividade laboral, segundo o estudo conduzido por Lakhani (1982) em minas de carvão (subterrâneas e de superfície) dos EUA. As alterações tecnológicas são associadas, em Iliş et al. (2009), aos fatores “*nível de concentração*” e “*intensidade de trabalho*”, enquanto Hadenius (2006) apresenta a tecnologia *wi-fi* como uma inovação que melhora a informação disponível no interior da mina e, consequentemente, a segurança e produtividade de operação.

Na vertente de organização e gestão, são apontadas as seguintes opções:

- A utilização da filosofia “*Total Quality Management*” (TQM), como instrumento de melhoria da produtividade (Roberts 1995);
- Na abordagem de Okely (2009), o aumento de produtividade é associado à gestão de *stocks* e aquisição de peças de desgaste de última tecnologia;
- A utilização de um modelo de manutenção preditiva, de modo a reduzir o número e duração de avarias/falhas, como fator importante na melhoria da produtividade e eficiência económica da indústria mineira polaca (Lipowczan 1991);
- Na análise dos fatores que influenciam a produtividade do trabalho numa mina de ouro na Arábia Saudita, Aljuhani (2002) conclui que em cada turno os trabalhadores gastam 35% do tempo em atividades não produtivas;
- Os fatores comportamentais, cultura e atitudes são apontados por Roberts (2005) como determinantes da produtividade em minas carvão australianas;
- O aumento da produtividade, baseado na mudança organizacional e redes de comunicação é a proposta sugerida por Hall (2010);
- Uma correlação significativa entre indicadores de produtividade, saúde e atributos organizacionais foi encontrada por Hole e Pande (2009).

Quanto às métricas ou modos de quantificar a produtividade, são descritas as seguintes abordagens:

- Análise global sobre os diferentes aspetos de interesse na quantificação da produtividade (Topp, et al. 2008) e utilização de indicadores operacionais tradicionais⁷⁷ (Iliş, et al. 2009);
- Determinação dos custos anuais, que Yassin (2007) estima em 62.8 bilhões de dólares, no ano de 2003, com base nos dias de trabalho perdidos (ACIW⁷⁸) e perda de produção (ACLP⁷⁹) de trabalhadores americanos, com idades entre 18 e 64 anos. O autor salienta que as taxas de dias perdidos são superiores para as mulheres e para o setor mineiro;

⁷⁷ Conceitos retomados na descrição posterior (metodologias e aplicação prática), onde serão detalhados.

⁷⁸ *Annual Cost of Lost Work* (ACIW).

⁷⁹ *Annual Cost of Lost Productivity* (ACLP).

- Relação entre a dimensão das minas e a produtividade, estabelecida por Grayson (2001), o qual conclui que, em geral, quanto maior é a dimensão da mina, maior a sua produtividade, medida em tons/trabalhador.hora;
- O mesmo tipo de unidade, no caso tons/homem.ano, é também utilizado por Hardman (1996) na comparação de produtividade entre minas de carvão sul-africanas, australianas e americanas;
- Em Youle e Parsons (2009) é quantificado o tempo de trabalho perdido, devido ao excesso de calor, que relacionam com a perda de produtividade. No mesmo sentido, a designação do tempo a quantificar para análise dessa relação, numa situação de ondas de calor, é indicado em Parsons (2009) por '*tempo fora da tarefa*';
- Para aplicação em ambientes quentes e húmidos, Zhao, Zhu e Lu (2009) propõem modelos baseados no tempo de tolerância ao calor e na produtividade, desenvolvidos a partir de dados obtidos em ensaios com atmosfera controlada, em três condições de intensidade de carga de trabalho, variando a temperatura e a humidade do ambiente;
- Medição da *performance* dos equipamentos mineiros, através da utilização do indicador *Overall Equipment Effectiveness* (OEE)⁸⁰, descrito em *Utilizing existing manufacturing data to calculate OEE* (2010) e proposto por Elevli (2010).

Outras referências à produtividade abordam o tema em interligação com os outros dois elementos relevantes para o presente estudo: segurança e ambiente térmico.

Introduz-se aqui uma nota para salientar que as evoluções de produtividade e de nível de segurança podem ser de sentido idêntico ou contrário, consoante as situações consideradas e que seguidamente se concretizam, através de exemplos:

- Os acréscimos (decréscimos) simultâneos de produtividade e segurança ocorrem sempre que as causas têm uma influência idêntica nas duas grandezas, o que acontece, por exemplo, quando melhoramos aspetos relacionados com a organização e gestão do trabalho (Sanmiquel, et al. 2010), (Zhang, et al. 2007), (Feng 2002), (Szwedzicki 2003), (Potts, Smith e Hylko 2003), o treino e formação (Jia 1984), (Fiedler, et al. 1984), (Peters 2002), diminuição do uso de álcool e drogas (Barton 2002), introdução de redes de comunicação (Walker 2010), mecanização (Sari, Duzgun, et al. 2004), gestão integrada de frota (Nix 2008), (Carter 2010a), para se referirem algumas das áreas já focadas em citações anteriores;
- Em contraposição, outros aspetos produzem na produtividade e segurança, efeitos contrários. Estão neste grupo, por exemplo, os ganhos de produtividade conseguidos pelo aumento da duração ou intensidade de trabalho, as evoluções tecnológicas e equipamentos que potenciam ou introduzem novos riscos (Kecojevic e Nor 2009), (Xu e Chen 2003) ou maior severidade nas consequências de acidentes (Grayson 2001).

Sobre a variação relativa de produtividade e segurança, o estudo apresentado em (Zabetakis 1981) indica que nos EUA, nos últimos 50 anos, as taxas de frequência de lesões incapacitantes e de acidentes mortais, em geral, variam inversamente com a produtividade. Em contraponto, Tsolas e Petrakis (2001) indicam a existência de um

⁸⁰ OEE = *Availability x Performance x Quality*.

tradeoff entre lesões incapacitantes e o *output* de uma mina de carvão grega, onde incidiram a análise.

Em resumo, constata-se que a relação entre as duas grandezas – produtividade e segurança – não é uma função monótona, evoluindo no mesmo sentido ou inversamente, em função dos fatores que originam as suas respectivas variações.

Para concluir esta nota, é de referir que o efeito de ambientes quentes e húmidos⁸¹ é análogo para as duas grandezas, ou seja, ambientes desconfortáveis ou extremos afetam negativamente, quer o desempenho, quer a segurança de operação, conforme se pode perceber, por exemplo, da leitura dos efeitos elencados por Sá (1999) e apresentados no quadro 2.4.

Complementarmente, um amplo conjunto de estudos recentes tratam diferentes aspetos da relação entre a exposição ao calor e a produtividade, como referem Kjellstrom e Haylee (2009). A título exemplificativo, apresentem-se alguns outros estudos que versam essa relação e confirmam esse entendimento, nomeadamente:

- As experiências em minas de ouro sul-africanas, que mostram os efeitos adversos de ambientes de stresse térmico na segurança e produtividade (Wagner 2001) ou a forma como, no mesmo tipo de mina, a produtividade é afetada pelo valor médio da temperatura de bolbo húmido (Krige e Barnard 1981);
- O trabalho físico em ambientes quentes e húmidos impõe riscos para a saúde, a queda da produtividade e problemas de segurança para os trabalhadores (Liang, et al. 2011), (Ribeiro 2010). Também Sauerborn, Kjellstrom e Nilsson (2009) consideram essa relação, explicando que da exposição a temperaturas elevadas podem advir efeitos diretos e indiretos, destacando-se para o presente propósito, a afetação da saúde humana e os efeitos na produtividade, devidos aos mecanismos fisiológicos;
- Incremento da produtividade da empresa, através de:
 - ✧ estratégias para reduzir os efeitos do meio ambiente sobre os trabalhadores, por aplicação de medidas de engenharia (Bates 2005);
 - ✧ utilização de um monitor pessoal de stresse térmico, permitindo-lhes trabalhar mais perto dos seus limites, em ambientes com temperaturas elevadas (Cohen 1988);
 - ✧ instalação de ventilação apropriada, para anular o desconforto e consequente stresse térmico do trabalhador, com interesse acrescido nos planos energético e de melhoria dos índices de produtividade, defendem Talaia e Rodrigues (2006);
 - ✧ arrefecimento intermitente das pessoas, durante o período de descanso, como alternativa prática para reduzir a fadiga e o stresse térmico, quando se aplicam ciclos de trabalho/descanso (Constable 1994);
 - ✧ reposição de fluidos para evitar a desidratação que normalmente compromete a produtividade e segurança do trabalhador (Clapp, et al. 2000);

⁸¹ Um dos elementos centrais deste trabalho.

- No mesmo sentido global, mas numa abordagem quantitativa, assinalam-se os seguintes trabalhos:
 - ✧ tabela de decréscimo de produtividade em função do aumento de temperatura, apresentada por Eston (2005), tomando por base uma operação de perfuração mineira pesada. Segundo o estudo, a redução de produtividade é de 75%, quando a temperatura atinge 37°C;
 - ✧ estudo aplicado a funcionários de escritório (Witterseh, et al. 2004), onde se evidencia que o aumento de temperatura de 20°C para 24°C induz uma redução de desempenho médio entre 40 e 50%;
 - ✧ resultados de estudos aplicados a *call centers* por Seppänen, Fisk e Faulkner (2005), indicam quebras de produtividade de 15% quando a temperatura sobe de 24,8°C para 26°C, ou decréscimos de 1,8% e 2.2% por cada °C de aumento, respetivamente, quando a temperatura se situa em torno de 25°C ou acima desse valor. Num outro estudo dos mesmos autores, aplicado ao contexto de uma fábrica de confeção têxtil, é indicada a diminuição de 8% na produtividade quando a temperatura sobe de 23,9°C para 32,2°C;
 - ✧ dados recolhidos em salas de aula de duas escolas na Dinamarca, envolvendo 300 alunos, obtidos e tratados por Wyon (2010), mostram a diminuição de 3.5% na 'performance' dos alunos, por cada grau de aumento na temperatura. O autor constata que esses resultados confirmam a dimensão dos efeitos do ambiente térmico no desempenho, referidos pela primeira vez em 1967: “+10°C conduzem à diminuição de 35% no trabalho escolar”

A tradução gráfica do conjunto de estudos quantitativos identificados e supra citados, pode ser vista no gráfico da figura 2.6.

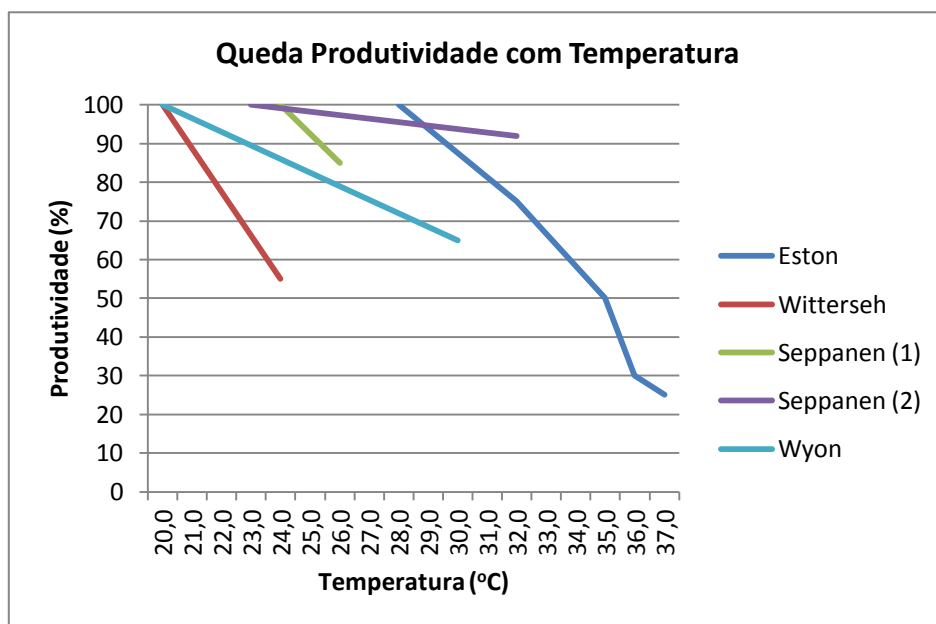


Figura 2.6 – Relação entre temperatura e produtividade
(1) – *Call centers*; (2) – Indústria têxtil

Da mera análise do gráfico apresentado, podem retirar-se as seguintes ilações:

1. O decréscimo de produtividade associado ao aumento de temperatura é uma evidência, transversal a todos os estudos;
2. As amplitudes térmicas (temperatura mínima / máxima) consideradas em cada estudo e as correspondentes taxas na quebra de produtividade (declive das curvas) são muito díspares, o que não possibilita a generalização dos resultados.

Note-se que os resultados referidos em 1. são concordantes com as afirmações - de caráter qualitativo - que sobre o comportamento relativo dessas duas grandezas têm sido amplamente proferidas. Vejam-se, a esse propósito, as seguintes considerações:

- *“Os estudos mostram uma clara tendência de que o desconforto causado pelo calor ou frio reduz a performance humana⁸².”* (Lamberts e Xavier 2002);
- *“O ser humano, no desempenho de suas atividades, quando submetido a condições de stresse térmico, tem entre outros sintomas, a debilidade do estado geral de saúde, alterações das reações psicossensoriais e a queda da capacidade de produção.”* (Lamberts e Xavier 2002);
- *“A concentração e a capacidade física dos trabalhadores é afetada, o que naturalmente irá comprometer a produtividade da empresa e, não menos importante, irá criar condições favoráveis à ocorrência de acidentes de trabalho.”* (Sá 1999);
- *“(…) Com o aumento da temperatura, o rendimento cai, a velocidade do trabalho e a concentração diminuem, as pausas tornam-se maiores e mais frequentes, e os erros e acidentes aumentam, sendo esse efeito claro a partir dos 30°C.”* (Costa et al. 2011);
- *“O aumento da exposição ao calor implica uma redução no desempenho”,* referem Costa, Baptista e Diogo (2011), a qual associam à designada *“adaptação autónoma”*, que consiste na diminuição do ritmo de trabalho como mecanismo comportamental de defesa do indivíduo ao excesso de calor (Kjellstrom, Holmer e Lemke 2009), (Miller et al. 2011).

Esse tipo de adaptação foi considerada, já na década de 80, por Vogt (1983), o qual evidenciou os *“ciclos de trabalho / descanso espontâneos, durante a exposição ao calor”*;

- *“O stresse térmico tem efeitos fisiológicos sobre os trabalhadores, pode levar à redução do entusiasmo de trabalho e produtividade, ao aumento da taxa de incidentes e de doenças causadas pelo calor e à morte.”*, referem Yi e Chan (2013);

as quais ilustram as ideias chave partilhadas pela generalidade dos estudos sobre o assunto.

Quanto à segunda ilação, retirada da análise do gráfico da figura 2.6, constata-se que os resultados descritos, em si mesmos, não são comparáveis. Algumas razões podem ser apontadas para justificar essa realidade:

⁸² Embora os resultados de inúmeras investigações não sejam conclusivas a esse respeito, como também referem os mesmos autores.

- Os estudos são aplicados a diversos setores de atividade (escritórios e *call centers*, fábrica têxtil, minas), com diferentes graus de exigência e esforço na realização das tarefas;
- Os ambientes e amplitudes térmicas dos estudos são diferenciados, o que inviabiliza o estabelecimento de um padrão comum;
- Os estudos apresentam como debilidade metodológica o facto de apenas considerarem, como parâmetro ambiental, a temperatura. Consequentemente, ao não integrarem a humidade - a qual se sabe, já desde a década de 70, possuir uma influência determinante no efeito produzido pelo ambiente térmico nos indivíduos⁸³ - obtêm resultados que não são conclusivos ou generalizáveis, podendo considerar-se essa a mais importante lacuna dos trabalhos citados.

Em complemento a estas três ideias, extraídas diretamente dos exemplos, são referidos na literatura vários outros aspetos importantes, para a quantificação da relação ambiente térmico – produtividade. Nos dois estudos que seguidamente se citam - para se ilustrarem os fatores em causa – os autores indicam terem realizado pesquisas sobre a resposta humana a ambientes quentes, com o objetivo de agrupar todos os elementos entendidos como relevantes, nas diversas abordagens e trabalhos publicados. Pode, pois, considerar-se que sintetizam e refletem o conhecimento atual nesta matéria, o qual se consubstancia, resumidamente, no seguinte:

- De acordo com a investigação descrita em Guedes, Baptista e Diogo (2011), o grau de tolerância a ambientes quentes (e consequentemente o desempenho) depende de três grupos de fatores:
 - ✧ comportamentais (dispêndio metabólico na atividade e vestuário);
 - ✧ ambientais (calor e humidade);
 - ✧ individuais (idade, sexo, capacidade aeróbica, adiposidade, enfermidades e doenças crónicas, aclimação, medicação e alimentação);
- *“O estudo da relação entre o conforto térmico e produtividade é complexo pois depende de muitos fatores, entre eles, os individuais e, por essa razão, não têm o mesmo efeito para todas as pessoas.”* (Costa, Baptista e Diogo 2012).

A diversidade de elementos mencionados fundamenta os resultados apresentados na figura 2.6, considerando que os estudos foram conduzidos - no que concerne a cada grupo de fatores - em contextos heterogéneos, entre si.

Em suma, a validade dos resultados cinge-se às aplicações concretas que os originaram, não sendo extrapoláveis para outros âmbitos, conforme se observa. Esta é, aliás, uma das dificuldades no estabelecimento de um quadro quantitativo referencial, de aplicação geral, o que estimula o desenvolvimento de investigação adicional, futuramente.

Sobre essa necessidade, conforme apontam Costa, Baptista e Diogo (2011), a relação entre a exposição ao calor no trabalho e a produtividade têm sido objeto de estudo desde há vários anos, citando os trabalhos de Axelsson (1974) e Holmer (1996), no entanto, poucos estudos foram realizados com o objetivo de quantificar essa relação, em situações reais de trabalho. Também na perspetiva de Parsons (2009) - que foca outra vertente do problema -

⁸³ Ver, por exemplo, as variáveis consideradas no modelo de Fanger (1972) (vide ponto 2.2.2.3).

a relação entre os níveis de distração causados pelo calor e o nível de stresse não é conhecida, sendo necessários mais estudos para aprofundar esse tema.

Acerca do mesmo tema, vários outros autores desenvolveram e apresentam ‘*modelos de produtividade*’, constituídos por funções parametrizadas com base na recolha de dados reais, no decurso de atividades realizadas em contextos quentes e húmidos (Koehn e Brown 1985), (Thomas e Yiakoumis 1987), (Mohamed e Srinavin 2002) ou em dados recolhidos em ensaios laboratoriais controlados, para o mesmo tipo de ambiente térmico (Zhao, Zhu e Lu 2009). Independentemente da origem dos dados, todos esses estudos culminam na proposta de um conjunto de funções (modelo) que pretendem concretizar a relação analítica entre produtividade e ambiente térmico.

Face ao seu interesse, no âmbito do presente trabalho, esses modelos serão objeto de análise detalhada em capítulos posteriores.

Como síntese final deste capítulo, baseada na apresentação precedente da pesquisa bibliográfica relativa aos aspetos de segurança ocupacional, produtividade e ambiente térmico, podem extrair-se algumas ideias chave, justificativas das opções tomadas ou com interesse para o desenvolvimento subsequente, em concreto:

1. Aspetos conceptuais:

Os aspetos conceptuais e metodológicos, relativos ao ambiente térmico, foram perscrutados, no sentido de se obter um cenário de referência (ex.: conceitos, índices, fatores relevantes), partilhado e aceite pela comunidade científica, que possibilite a desejável comparação de resultados e o ‘diálogo’ entre investigadores e interessados na área.

A diversidade de fatores, visões e abordagens ao tema é imensa, o que ficou refletido nos resultados da pesquisa. A dimensão e abrangência do assunto inviabiliza o tratamento, simultâneo e em profundidade, de todos os aspetos envolvidos, quer pela multiplicidade e especificidade de conteúdos, quer por restrições temporais. Assim, será utilizada a informação identificada como representativa do ‘*estado de arte*’ atual na matéria, de acordo com os resultados obtidos na pesquisa efetuada, sempre que se tenha de recorrer a temas complementares aos considerados centrais, no âmbito da presente investigação.

2. Abrangência da pesquisa bibliográfica:

A pesquisa bibliográfica efetuada pretendeu evidenciar a panóplia de aplicações teórico-práticas de cada tema, o que justificou a descrição de exemplos tão díspares, como sejam os efeitos do ambiente térmico, por exemplo, em escritórios, estufas agrícolas, construção civil ou na produção animal.

Esta abordagem permitiu demonstrar a transversalidade do problema, independentemente de o setor de atividade fundamental a analisar ser o mineiro.

Um outro aspeto a mencionar, será o horizonte temporal: a maioria dos documentos listados é recente (posteriores a 2005), o que é imprescindível para se circunscrever o atual ‘*estado de arte*’.

No entanto, várias publicações anteriores foram também utilizadas, para se evidenciar as origens das propostas apresentadas, bem como o caminho percorrido

até aos nossos dias, numa perspetiva de análise evolutiva e integral dos problemas, o que se julga ter sido conseguido.

3. Índices:

O debate, acerca da aplicabilidade prática e assertividade dos resultados obtidos por cada índice de conforto ou stresse térmico, em termos relativos, continua em aberto. Como anteriormente se indicou, a participação nessa discussão transcende o âmbito do presente trabalho. Nesse sentido, também neste caso se utilizarão - para as mensurações necessárias - os índices identificados como de aplicação mais consensual e generalizada.

4. Segurança e produtividade:

As abordagens que incidem nestas questões são, maioritariamente, dirigidas para aspetos paralelos e complementares (ex.: segurança estrutural, controlo de explosões ou incremento de produtividade pela adoção de novas tecnologias e redes de comunicações) ao objetivo que se propõe para o presente trabalho, o qual consiste na relação daquelas variáveis com o ambiente térmico.

Face à multiplicidade de fatores envolvidos, os diferentes autores optam, naturalmente, por desenvolver o assunto na vertente da sua respetiva área de especialidade. Como resultado, as diversas abordagens descritas são, regra geral, focadas em aspetos parcelares e específicos, debruçando-se exclusivamente sobre os efeitos que um ambiente térmico adverso produz nas áreas de saúde, segurança e produtividade, consideradas separadamente, não integradas.

Complementarmente, constata-se que a informação publicada é tendencialmente qualitativa, não disponibilizando resultados que possam medir a interação entre as grandezas, excetuando-se os estudos quantitativos sobre produtividade, sintetizados na figura 2.6 e nas referências a ‘modelos de produtividade’, os que abordam doenças e problemas de saúde (Donoghue 2005), (Gancev 2006) ou o trabalho sobre os riscos para a saúde, associados à prática de esforço em condições de calor extremas (Guedes e Baptista 2011), entre outros exemplos.

Este aspeto decorre do facto de a segurança ocupacional ser uma variável de difícil quantificação, porquanto os seus efeitos manifestam-se durante períodos temporais longos, não sendo exequível medir o nível de segurança e as suas correspondentes consequências de forma instantânea, como é possível, por exemplo, para temperaturas ou velocidades.

Outra dificuldade está associada ao facto de o desempenho nesta área depender, não só dos meios e medidas físicas e organizacionais, implementadas para incrementar a segurança no conjunto de operações do processo produtivo – onde se inclui o controlo do ambiente térmico – como das características, formação, atitudes e comportamentos dos trabalhadores.

Um último elemento que condiciona a medição da grandeza segurança é a profusão de métricas utilizadas na sua avaliação, podendo referir-se que não existe uma metodologia de cálculo universal, dificultando a execução de análises comparativas de resultados e a validação e congruência da informação.

Como denominador comum a todas as abordagens, está a tentativa de transformar um acontecimento ou variável discreta (acidente), numa outra que possa ser lida numa

escala contínua, enquanto propriedade intrínseca ao trabalho, problema que está longe de se encontrar resolvido.

Na pesquisa realizada não foram encontrados trabalhos que correlacionem a segurança com o ambiente térmico, de forma direta e em termos quantitativos. Os valores disponíveis e índices determinados nos estudos quantificados resultam da conjugação da globalidade dos fatores que condicionam a segurança, não sendo possível identificar o contributo isolado de cada parcela e, portanto, do ambiente térmico. Essa relação, como se mencionou, é apenas veiculada qualitativamente.

Analogamente ao referido para a variável segurança, também para a produtividade se constata a utilização de diferentes métricas ou modos de quantificação, decorrentes da ótica adotada e que condicionam a comparação entre resultados obtidos nos diferentes estudos.

Em suma, da recolha bibliográfica realizada, sobressai que o trabalho executado em atmosferas quentes é, para os seres humanos, um fator potenciador de ocorrência de acidentes e de perda de ‘rendimento’, o que se verifica ser consensual.

No entanto, de acordo com os resultados do levantamento efetuado e em consequência dos considerandos anteriores, verifica-se existir um amplo espaço de investigação em aberto, no que concerne à quantificação das relações existentes entre as variáveis em causa e aspetos correlacionados. Essa constatação permite fundamentar o interesse e necessidade do presente trabalho e das metodologias propostas.

Para finalizar, salienta-se que nos pontos seguintes - onde será desenvolvido o ‘corpo principal’ do trabalho - serão considerados e incorporados os conceitos, metodologias, instrumentos, índices e demais informação relevante, de entre a identificada na anterior pesquisa, para fazer face às necessidades e de acordo com as realidades e contextos que são abordados.

3. OBJETIVOS E METODOLOGIAS

Na sequência da pesquisa bibliográfica realizada e apresentada no capítulo anterior, foi possível encontrar investigação com maior ou menor nível de profundidade nas cinco primeiras das seis hipóteses de trabalho levantadas. Está, por isso, ainda por resolver o problema da quantificação económica da relação entre as condições de ventilação, segurança e produtividade. Nesse sentido, presume-se haver espaço e interesse na realização de estudos que incidam na quantificação dos efeitos de ambientes quentes e húmidos na produtividade e segurança laborais, o que constitui o âmago e propósito final da presente tese.

Para concretizar essa pretensão, torna-se necessário definir os objetivos a atingir e as metodologias a empregar para os alcançar, o que se descreve no desenvolvimento subsequente do presente capítulo.

3.1 Objetivos

Os objetivos propostos para o presente trabalho podem ser agrupados segundo duas óticas complementares:

- Uma, de cariz estratégico, global, em que se explicitam os objetivos coletivos e individuais a atingir com a execução do trabalho;
- Outra, nas vertentes tática e operacional, onde se enunciam os objetivos orientados para a resolução dos problemas alvo de estudo.

É de referir que o primeiro grupo de objetivos (nível estratégico⁸⁴) foi enunciado no designado *projeto de tese*, que antecedeu e fundamentou o presente trabalho. Nesse nível, como então se apontou, inserem-se aspetos relacionados com a melhoria do conhecimento e do “estado de arte”, a valorização pessoal e incremento de competências, a desejável transferência da investigação realizada para o sector produtivo, com impacte na atividade humana e no desempenho económico das empresas, entre outros.

No entanto, nesta fase, o segundo grupo (níveis tático e operacional⁸⁵) é aquele que se reveste de maior interesse, porquanto os objetivos aí definidos são orientados para a resolução das questões que, em concreto, se pretendem solucionar. Será, pois, unicamente sobre este grupo que se centrará a análise e descrição subseqüentes.

Neste contexto, os objetivos a ponderar surgem do problema identificado⁸⁶, das hipóteses de trabalho⁸⁷ e do resultado da pesquisa bibliográfica efetuada⁸⁸.

⁸⁴ Designação análoga à tradicionalmente adotada para os níveis de planeamento (Chiavenato 2006).

⁸⁵ Idem.

⁸⁶ Vide Capítulo 1.

⁸⁷ Idem.

⁸⁸ Vide Capítulo 2.

Como se enunciou na descrição apresentada no capítulo 1, o problema global resulta da integração de quatro problemas parcelares (P1 a P4). Os objetivos podem assim ser definidos em articulação com essa decomposição, segundo dois planos:

- *Específico*: dirigido à resolução de cada um dos problemas particulares constituintes;
- *Global*: focado na resolução do problema geral.

Iniciando-se pelos específicos e em consonância com os problemas singulares referidos (P1 a P4), podem elencar-se os seguintes objetivos (O):

- O1: Mensurar os efeitos produzidos pelo ambiente térmico (quente e húmido) na produtividade e segurança ocupacionais;
- O2: Nos locais de estudo, relacionar as condições de ventilação (ex.: caudal, velocidade do ar, consumo energético) com os valores das variáveis térmicas (ex.: temperatura, humidade);
- O3: Traduzir em unidades monetárias (u.m.), os valores das variáveis finais que representam as relações quantitativas entre as grandezas que integram os objetivos O1 e O2.

A concretização destes três objetivos instrumentais cria as condições prévias de suporte ao objetivo global final (OG), que consiste em:

- OG: Estabelecer um modelo que possibilite avaliar a relação custo/benefício, mensurada em u.m., entre alterações das condições de ventilação (custos) e as correspondentes variações induzidas na ‘produção’ (proveitos), cuja aplicação permita otimizar o desempenho de trabalhadores e respetivas empresas.

Retomando a estrutura de diagrama utilizada para ilustrar as hipóteses de trabalho (capítulo 1), esquematizam-se, na figura 3.1, os objetivos mencionados.

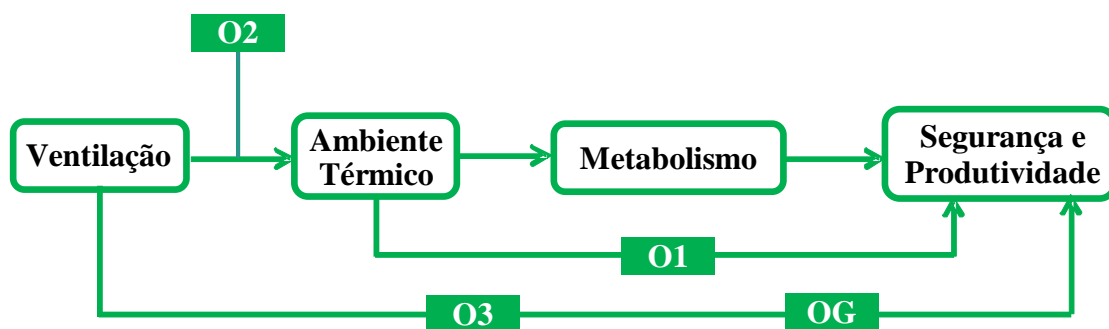


Figura 3.1 – Objetivos (O1 a O3 e OG)

O cumprimento do objetivo global resultará, então, do culminar do processo de relacionamento entre grandezas e variáveis, numa ótica técnico-económica, quantificada.

3.2 Metodologias

As estratégias que foram desenvolvidas para se atingirem os objetivos atrás propostos englobam um conjunto diversificado de abordagens, métodos, instrumentos e tarefas, que se associam para a obtenção do resultado final. Na descrição seguinte, distinguem-se, desde logo, os aspetos metodológicos que se dirigem à estrutura de desenvolvimento da investigação do tema (âmbito geral), dos que se focam na prossecução dos objetivos do trabalho (sumarizados no ponto 3.1, de âmbito específico). Esta diferenciação tem o intuito de evidenciar a existência de dois planos metodológicos distintos que, conjugados, possibilitam uma visão holística das metodologias a aplicar nas diferentes fases de desenvolvimento do trabalho.

Tome-se como ponto de partida o fluxograma apresentado na figura 3.2, onde se ilustra a estrutura global do presente trabalho de investigação.

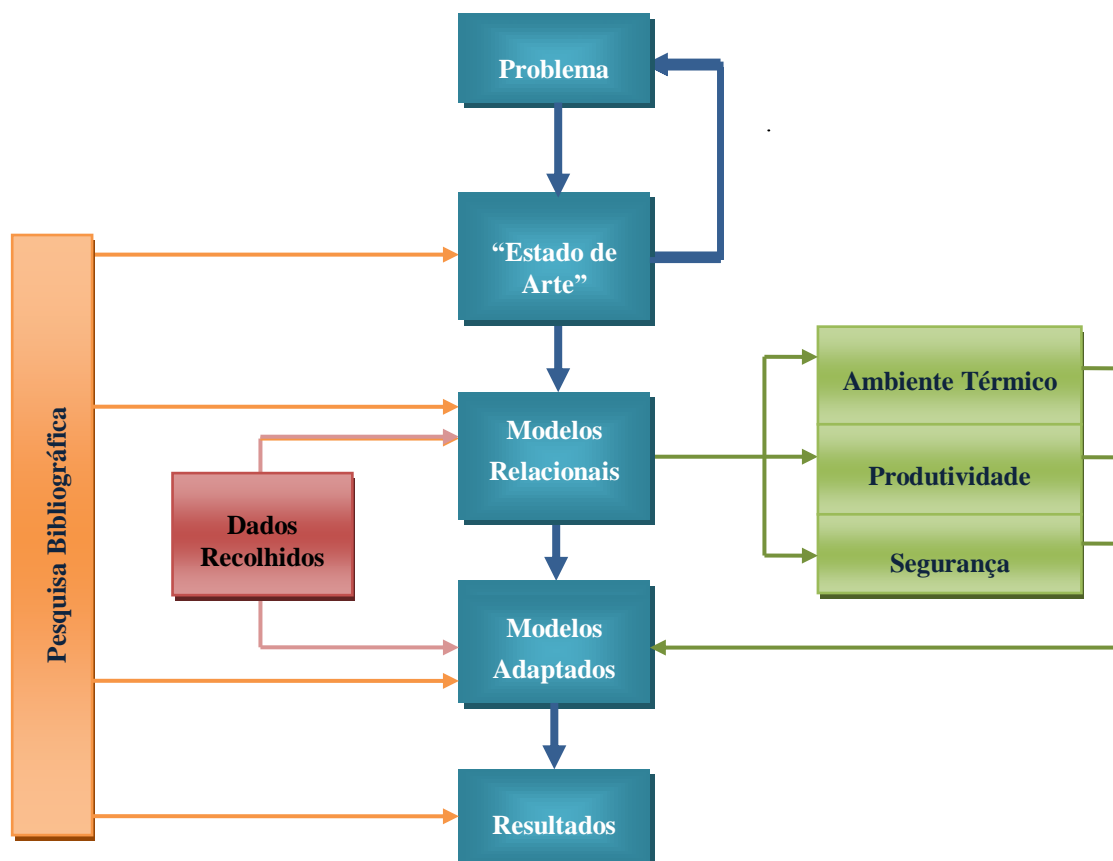


Figura 3.2 – Estrutura global da investigação

O esquema apresentado reflete a metodologia geral de abordagem ao tema, onde se estabelecem as ‘linhas gerais’ da sequência a prosseguir no estudo. Essa estruturação global do caminho a percorrer ‘funciona’ como referencial orientador do processo de investigação, razão pela qual se entendeu importante aqui referenciá-lo.

Como nota, refira-se que algumas das fases aí patentes foram já consumadas em pontos antecedentes, nomeadamente, a definição do problema (cap. 1) e a pesquisa bibliográfica para identificação do ‘estado de arte’ (cap. 2).

A realização das restantes fases enumeradas - cruciais para o sucesso do trabalho - está intimamente ligada com a concretização dos objetivos enunciados no ponto 3.1, relativos ao estabelecimento de relações e modelos entre as grandezas em análise (ambiente térmico, ventilação, produtividade e segurança). Em consequência, somos conduzidos para o âmbito específico do estabelecimento de metodologias que permitam atingir os objetivos (individuais e global) desejados. É nesse ‘plano metodológico’ que irá incidir a descrição posterior.

Previamente à exposição detalhada de cada uma das metodologias específicas, será útil expressar algumas observações, quanto a:

- Aspetos conceituais / práticos:

As metodologias serão descritas, no presente capítulo, numa ótica de arquitetura conceitual;

- Aquisição de dados:

Os ‘instrumentos’ metodológicos, em termos conceptuais, constituem um tronco comum a ambas as formas previstas para a aquisição de dados (ambientes experimentais (laboratório) ou reais (minas)), as quais se diferenciam, usualmente, apenas na componente aplicada.

Sem perda de generalidade, serão realçadas as diferenças metodológicas para cada caso, quando ocorram.

- Modo de apresentação:

Considerando que as metodologias específicas a propor têm como propósito proporcionar os meios para se atingirem os objetivos definidos, entende-se ser desejável apresenta-las separadamente, em direta relação com aqueles. Assim, para cada objetivo (O1 a O3, OG) serão descritas as metodologias que diretamente se lhes associam.

Após estas observações prévias, as metodologias são seguidamente elencadas pela ordem dos objetivos a que respeitam, conforme esquematizado na figura 3.3.



Figura 3.3 – Sequência de objetivos/metodologias

3.2.1 Metodologias/objetivo O1

Para identificar os efeitos do ambiente térmico na produtividade e segurança laborais é necessário, primeiramente, obter um conjunto de valores que reflitam a situação e que, posteriormente, possam ser utilizados no relacionamento entre as grandezas em análise, conforme se representa na figura 3.4.

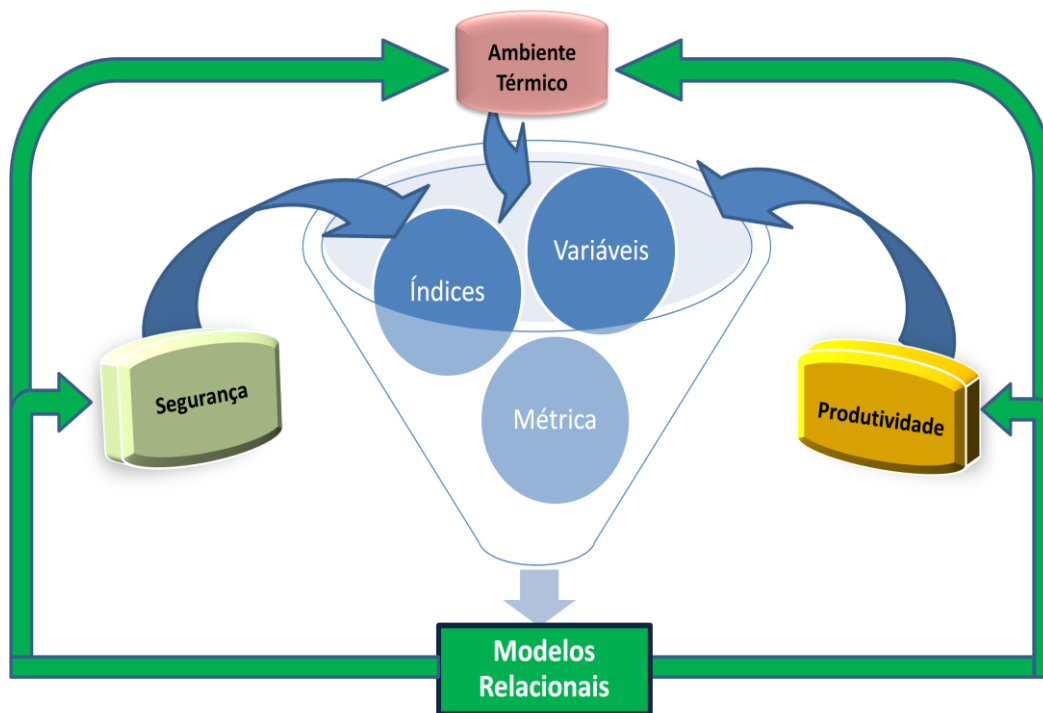


Figura 3.4 – Ambiente térmico, segurança e produtividade

Os problemas a tratar são de diversa ordem: numa primeira fase, há que definir as variáveis, índices e métricas a utilizar na medição individualizada de cada uma das grandezas (ambiente térmico, segurança e produtividade), para caracterização dos seus correspondentes ‘estados’ e variações. Numa fase seguinte, após quantificação desses parâmetros individuais, estabelecer-se-ão as relações de dependência entre o conjunto. Inicie-se, então, pela descrição das metodologias preconizadas para resolver as questões que constituem as primeiras fases de cada uma das três grandezas.

3.2.1.1 Medição do ambiente térmico

Conforme se referiu no capítulo 2 (relativo à pesquisa bibliográfica efetuada), as variáveis a ter em conta no balanço térmico do corpo humano e que, portanto, servem de base aos estudos de conforto e stresse térmico, dividem-se em dois grupos⁸⁹: individuais e ambientais.

⁸⁹ Definidos por Fanger (1970) e confirmados por outros autores, como Águas (2001) e Chan (2008).

No presente ponto pretende-se caracterizar apenas o ambiente térmico, pelo que na contabilização dos efeitos pretendidos serão de considerar apenas as variáveis que integram o grupo ambiental, a saber⁹⁰: temperatura / humidade do ar e temperatura média radiante. Essas variáveis serão medidas, continuamente, no espaço e tempo de estudo, através de equipamentos de aquisição de dados disponíveis e adequados ao efeito.

Como se mencionou, as consequências do ambiente térmico no ser humano dependem da conjugação dos valores individuais medidos, para cada uma das variáveis focadas. Por razões práticas, será desejável estabelecer um índice que integre esses valores particulares e os traduza num valor único, de efeitos equivalentes.

Esse é o conceito (esquematizado na figura 3.5) inerente ao índice de stresse térmico, designado por WBGT⁹¹, cuja adoção se preconiza no presente trabalho⁹².

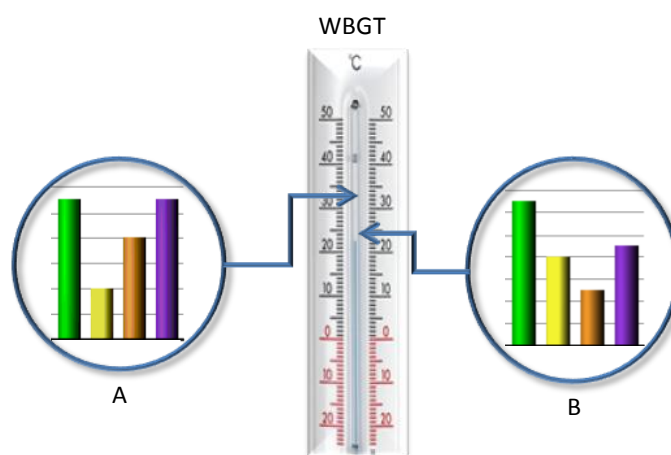


Figura 3.5 – Temperatura equivalente

A sua utilização permite caracterizar uma ‘realidade’ de ambiente térmico (A ou B) apenas com um único valor – uma temperatura equivalente⁹³ – numa escala unidimensional, facilitando a sua compreensão, comparação e estabelecimento de condições limite.

Em síntese, executa-se a medição e recolha de dados relativos às variáveis que intervêm na caracterização do ambiente térmico dos espaços onde se realizam as atividades/tarefas a monitorizar (câmara climática ou frentes de desmonte mineiro) e determina-se o valor de uma temperatura equivalente (WBGT).

⁹⁰ Idem.

⁹¹ A expressão de cálculo deste índice, baseada em dois parâmetros derivados (t_{bh} e t_g) dos referidos, foi indicada no capítulo 2 e será retomada posteriormente.

⁹² Opção que se encontra justificada no capítulo anterior.

⁹³ A noção de ‘equivalente’, aqui aplicado à temperatura, é um conceito amplamente utilizado nas áreas técnico-científicas, para traduzir o efeito global, simultâneo, produzido por um conjunto de valores das variáveis. Por exemplo, é usualmente definida uma tensão equivalente, unidirecional, no dimensionamento de um cordão de soldadura sujeito a um estado de tensão tridimensional (Critério de Von Mises, Eng. Mecânica) ou definida, como uma quantidade equivalente de madeira (kg), a carga de incêndio (material combustível de várias géneses) existente num dado espaço (Análise de Risco de Incêndio).

Esse índice é utilizado posteriormente, em substituição das variáveis iniciais, correspondendo a efeitos semelhantes aos produzidos por aquelas, no ser humano.

Nas medições e na determinação do índice, são utilizadas as unidades indicadas no quadro 3.1, no qual se resumem todos os elementos considerados no processo de quantificação do ambiente térmico.

Quadro 3.1 – Ambiente térmico (variáveis, índice e métricas)

		Unidade
Variáveis	Temperatura do ar	° C
	Humidade do ar	%
	Velocidade do ar	m/s
	Temperatura média radiante	° C
Índice	WBGT	° C

3.2.1.2 Medição da segurança ocupacional

A quantificação da segurança ocupacional é um dos fatores, a par da produtividade, que envolve maior complexidade na sua determinação, no contexto do presente trabalho. As propostas de medição desta grandeza, indicadas na literatura (cap. 2), baseiam-se nas seguintes métricas:

- Determinação de taxas e índices, estipulados para avaliar a evolução de acidentes e da mortalidade (Leger 1991), (Blank, et al. 1998), (Hendryx e Ahern 2009), (Sanmiquel, et al. 2010), entre outros;
- Número de ocorrências, assentes no registo do número absoluto de acidentes e/ou mortes, num determinado período de tempo (Li, et al. 2004), (Shi 2009), (Kecojevic e Nor 2009), (Zhang, et al. 2011), entre outros;
- Evolução das taxas *Experience Modification Rate* (EMR) (Hoonakker, et al. 2005) ou *Total Factor Productivity* (TFP) (Shi e Gao 2010);
- Contabilização de dias perdidos (Coleman e Kerkerling 2007), (Kukic, Ikanovic e Kudumovic 2009);
- Média de dias perdidos (Vazirinejad e Esmaeili 2009);
- Custos de cuidados médicos relativos a doenças respiratórias (Houtven, et al. 2010).

A análise das propostas elencadas para mensuração da grandeza ‘segurança’ permitem identificar os seguintes ‘campos de ação’ e restrições nas suas aplicações práticas:

- Os valores obtidos em a) e b) são úteis para comparações inter e intra-setoriais, bem como entre realidades de países diferentes, numa visão geral do problema. Tratam os dados de modo global, não diferenciando as suas causas, pelo que não é possível identificar a parcela de ocorrências nefastas causadas pelo ambiente térmico. Também o horizonte temporal para esta contabilização estatística é necessariamente

- longo, no mínimo superior a um ano, o que não se compagina com a monitorização de efeitos e variações em ‘tempo real’, pretendida neste estudo;
- ii. As taxas consideradas na alínea c) computam parâmetros que não se integram no âmbito do trabalho, nomeadamente, tomando como exemplo a TFP: medição do impacte económico, no longo prazo, de alterações tecnológicas e outras, que não os *input* tradicionalmente considerados (capital e trabalho);
 - iii. A determinação do número absoluto ou média de dias perdidos, indicados nas alíneas d) e e), fará sentido se abranger um período temporal amplo, analogamente ao referido em i;
 - iv. Também a análise de custos com cuidados médicos, proposta em f), é uma medida que se revela, neste caso, pouco eficiente, em virtude de não serem conhecidos registos globais e dados desagregados por causa, sobre essa matéria, no plano nacional.

No âmbito da aplicação pretendida e pelas razões invocadas (i. a iv.), resulta inviável a utilização direta de uma qualquer métrica, de entre as que foram identificadas nos estudos publicados sobre o tema.

Considerando que não existe informação quantitativa disponível, que identifique as consequências na segurança induzidas pelas condições ambientais, o pretendido relacionamento entre essas grandezas não será exequível, por essa via. Consequentemente, será necessária uma nova abordagem para atingir essa finalidade. Nesse sentido, a metodologia que se propõe para contornar os constrangimentos identificados consiste na medição do denominado ‘*tempo fora da tarefa*’, parâmetro referido por Parsons (2009) e utilizado no estudo deste autor sobre o efeito do ambiente térmico na produtividade laboral⁹⁴. Esse parâmetro, como a sua designação indica, mede o tempo de paragem do trabalhador. Os pressupostos para a utilização desse indicador na medição da segurança são:

- O *tempo fora da tarefa* (TFT) ser contabilizado, apenas e só, se for consequência evidente do ambiente térmico e diretamente relacionado com problemas de segurança (acidentes, incidentes ou quase-acidentes);
- O TFT ser medido em simultâneo com o registo das condições de ambiente térmico existentes (temperatura equivalente, WBGT).

Se cumpridos os pressupostos indicados, a relação dos TFT e WBGT pode esquematizar-se na figura 3.6.

Com base nos dados recolhidos (pontos a preto) é possível ajustar uma função (linha a vermelho escuro) que traduza a relação entre as duas grandezas: *segurança*, representada pelo indicador TFT (em ordenada) e *ambiente térmico*, representado pelo índice WBGT (abcissa).

As vantagens comparativas da utilização desta métrica podem sintetizar-se nos seguintes pontos:

⁹⁴ Parâmetro que será retomado quando for descrita a forma de medição da produtividade (ponto seguinte).

- A medição dos tempos de paragem traduz o impacte direto do ambiente térmico na segurança dos trabalhadores, em dois vetores importantes:
 - a) *incidência*, medido no momento em que ocorre;
 - b) *severidade*, associada à duração real de imobilização ou não produção;
- Os TFT são mensurados numa escala de tempo (minutos) compatível com a utilizada nas restantes medições, no quadro de vigência do estudo (necessariamente, de curto prazo);
- Numa perspetiva instrumental, como se verá adiante, a utilização desta mesma métrica na medição da produtividade, facilita a adição dos efeitos das duas grandezas e as suas conversões para unidades monetárias.

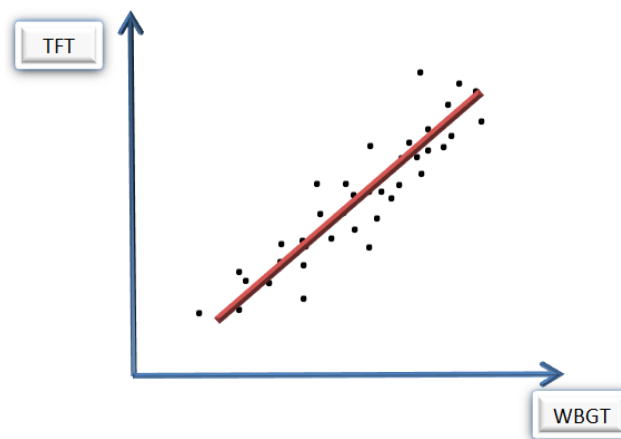


Figura 3.6 – Ajustamento da função segurança / ambiente térmico

Para a determinação prática do “tempo fora da tarefa”, relacionado com questões de segurança, subsiste uma dificuldade:

- Como identificar que o problema que conduz à paragem (TFT) é consequência direta das condições de ambiente térmico presentes?

Num plano teórico, esta dificuldade pode ser contornada de diferentes modos, dependendo do tipo de dados a obter ou existentes *a priori*, nomeadamente:

- a) Existência de estudos validados, com dados publicados (dias perdidos, taxas) que relacionem inequivocamente as duas grandezas;
- b) Medição de TFT associadas a ocorrências de segurança reais em cada patamar de condições ambientais, conforme proposto. Neste caso, para se estabelecer a correlação existente entre as duas grandezas, será necessário efetuar um elevado número de medições, garantindo a constância dos restantes fatores (ex.: equipas, atividades, processos tecnológicos), por forma a construir uma série de dados representativa do problema;
- c) Para cada condição ambiental, realizar a monitorização de parâmetros metabólicos dos indivíduos (ex.: consumo de oxigénio, temperatura corporal, ritmo cardíaco) e estabelecer a sua relação com os níveis de atenção, agilidade, destreza, tempo de reação (entre outros), que potenciam a probabilidade de ocorrência de acidentes.

A concretização com sucesso, de qualquer uma das três alternativas indicadas, possibilita o estabelecimento da relação entre o ambiente térmico e a segurança ocupacional, traduzida na função esquematizada na figura 3.6.

Porém, a transposição das alternativas de resolução apontadas, do plano teórico para o prático, têm as seguintes limitações:

- No momento presente, de acordo com o levantamento realizado na pesquisa bibliográfica e pelas razões já anteriormente evocadas (métricas diferenciadas, dados não desagregados, etc.), a alternativa a) não é concretizável, por ausência de informação disponível;
- A opção c), em que se relacionam parâmetros metabólicos com o desempenho em segurança, é apontada na literatura como uma evidência consensual, num plano qualitativo (Sá 1999), (Wagner 2001), (Lamberts e Xavier 2002), (Costa, Baptista, *et al.* 2011), entre outros.

As sintomatologias que fundamentam este efeito (ex.: vertigens, tonturas, diminuição da destreza e da capacidade mental, aumento do tempo de reação, câibras) são elencadas por Sá (1999) e encontram-se sintetizadas no quadro 2.4, capítulo 2. No entanto, como refere Parsons (2009), a relação do calor com os níveis de distração não é conhecida, sendo necessários mais estudos para aprofundar o tema. Consequentemente, no plano quantitativo, a informação disponível é também insuficiente, para o corrente propósito;

- Por fim, a alternativa b) baseia-se no tipo de medição proposta para a avaliação da grandeza, pelo que, desse ponto de vista, é exequível e consistente com a metodologia proposta.

Há, no entanto, um óbice ao estabelecimento da relação entre as grandezas, por esta via: para que a série seja representativa, a recolha de dados deve abranger um período de tempo extenso, no sentido de compilar as ocorrências que se sucedem, a espaços de tempo, analogamente ao indicado para as restantes alternativas. Essa necessidade constitui um constrangimento intransponível, no âmbito do presente estudo, face às limitações de tempo para a sua execução.

Como se verifica, existem limitações ou insuficiente informação de suporte, para qualquer das alternativas disponíveis.

A opção apontada – medição dos TFT – é entendida como a mais viável e assertiva no atual contexto, considerando que:

- É possível estabelecer uma relação causa/efeito entre as condições de ambiente térmico e a ocorrência de acidentes, o que possibilita a sua aplicação direta;
- Permite integrar novos dados validados, quando surjam, convertendo as taxas e índices determinados em '*tempos fora da tarefa*'. Este processo – aberto e dinâmico – possibilita a integração da informação disponível a cada momento, tornando a medida (TFT) evolutiva, abrangente e permanentemente atualizada;
- A conversão dos tempos de imobilização em valores monetários, associados à perda de produção, é facilitada.

Aspetos metodológicos complementares, referentes à medição simultânea da segurança ocupacional e da produtividade, relacionadas com o ambiente térmico, serão objeto de descrição conjunta posterior, quando se finalizar a exposição do corrente ponto (3.2.1). Analogamente ao realizado para o ambiente térmico, apresenta-se no quadro 3.2 a síntese das variáveis, índice e unidades a utilizar.

Quadro 3.2 – Segurança ocupacional (variáveis, índice e métricas)

		Unidade
Variáveis	Tempo Fora da Tarefa (TFT)	min
Índice	WBGT	°C

3.2.1.3 Medição da produtividade

Na sequência do levantamento efetuado sobre este tema, no capítulo 2, constata-se que a medição da produtividade é, também ela, objeto de diversas abordagens. Foram aí elencados os resultados dos estudos de distintos autores, onde se referem as quebras de rendimento globais, associadas a ambientes térmicos quentes.

É, no entanto, desejável referir alguns aspetos prévios, gerais, que nos permitam delimitar, não só o conceito de produtividade, em si mesmo, como a aceção considerada na aplicação prática proposta.

A produtividade, genericamente, representa uma relação entre *output* e *input*, ou seja, entre o resultado que se obtém (*output*) pela utilização de um conjunto determinado de recursos (*input*).

A quantificação da produtividade pode assumir um valor absoluto, quando se expressa como uma “quantidade” (número de peças, peso, volume) produzida num espaço de tempo ou, um valor relativo, se se considera a comparação entre a produção efetiva e um valor de referência pré-definido. Neste segundo caso é usualmente apresentada sob a forma de índice ou taxa (%).

Numa outra perspetiva, poder-se-á referir que a produtividade pode ser entendida, numa ótica de engenharia, como a medição da velocidade ou ritmo de trabalho (ex.: quantidade/tempo) ou, numa ótica de gestão, como a medição do valor económico unitário produzido (ex.: vendas/número trabalhadores).

Na indústria, ambas são usadas, por exemplo, como indexantes remuneratórios dos trabalhadores, dando suporte a decisões de âmbito distinto: a produtividade, na ótica do ritmo, como fator de diferenciação entre trabalhadores com idênticas funções (pares), enquanto a produtividade, na ótica de valor, como indicador de desempenho geral, do qual depende a evolução da massa salarial global ou a posição concorrencial da empresa no setor de atividade ou mercado em que se insere.

Analogamente ao referido para a variável segurança, também para a produtividade se constata a utilização de diferentes métricas ou modos de medição, consoante a informação

disponível ou as finalidades que se pretendem atingir, sendo, portanto, a tradução do conceito, no plano prático, realizada de modo diverso.

Sobre este aspeto, vejam-se os seguintes exemplos, resultantes dos estudos que relacionam a produtividade com a temperatura (vide cap. 2, ponto 2.2.4):

- *Output*: Nos estudos que abordam o desempenho em atividades administrativas, de formação e educação ou de atendimento, os resultados são indicados com base em aspetos de resposta cognitiva, como sejam, o nível de erros cometidos no processamento de texto (Witterseh, et al. 2004), (Seppänen, Fisk e Faulkner 2005); o tempo de resposta no atendimento em *call centres* (Seppänen, Fisk e Faulkner 2005) ou na execução de tarefas durante aulas de matemática e de línguas (Wyon 2010). Em qualquer destes casos, o *output* é definido de um modo que se pode considerar indireto, pela quantificação de erros e atrasos, numa perspetiva de *qualidade* do produto final obtido. Em contraponto, nas atividades de produção industrial, a métrica utilizada para quantificar o resultado em que se baseiam os cálculos de produtividade é a *quantidade* física, expressa, por exemplo, em número de peças, peso ou volume (Eston 2005);
- *Input*: no caso dos estudos apontados no ponto precedente, foi considerada, como variável de entrada, a temperatura dos espaços onde se realizaram as atividades estudadas.

A produtividade, nos referidos estudos, é então medida, percentualmente, como o decréscimo de rendimento em função do incremento no valor da temperatura ambiente, utilizando, para cada caso, as métricas acima referidas.

Após descrição dos aspetos de contextualização geral e das aplicações identificadas na pesquisa bibliográfica, segue-se a apresentação das metodologias a aplicar na medição desta variável, para as situações concretas do presente trabalho. Salienta-se que as metodologias a adotar, neste caso, diferem para as situações de aquisição de dados em ambiente experimental ou em contexto real. Assim, a apresentação é realizada separadamente para cada uma delas:

- **Contexto mineiro real**

Para esta situação e associadas ao ambiente térmico, existem decréscimos de produtividade associadas a duas vertentes:

- ✧ *Paragens de trabalho* - que se refletem em perda de produção - devidas à necessidade de períodos de ‘descanso’⁹⁵ dos trabalhadores sujeitos a condições térmicas desfavoráveis (McLean, et al. 2007), (Chan, et al. 2012). A necessidade de suspender a tarefa é definida em função dos níveis de temperatura corporal interna atingidos (monitorizados em contínuo, através de sensor de temperatura ingerível (Mc Caffrey, et al. 2008)) ou, complementarmente, pela frequência e duração das pausas - fixadas na norma ISO 7243: 1989 - em função dos valores de referência para o índice WBGT (indicados no anexo 2.3). Neste caso, analogamente ao indicado

⁹⁵ Tempo de trabalho perdido (Youle e Parsons 2009).

para a contabilização da segurança ocupacional, utilizar-se-á o *Tempo Fora da Tarefa* (TFT) (Parsons 2009) para a sua avaliação;

- ✧ *Diminuição do ritmo de trabalho*, como mecanismo comportamental de adaptação dos indivíduos ao excesso de calor (Kjellstrom, Holmer e Lemke 2009), (V. Miller, et al. 2011), denominado por “*adaptação autónoma*”, aspeto já focado nos anos 80 por Vogt (1983), que o designou por “*ciclos de trabalho / descanso espontâneos, durante a exposição ao calor*”. Para avaliar a perda de produtividade decorrente do decréscimo de ritmo, propõe-se a medição da quantidade física de minério produzido, em cada momento e situação (em tons/trabalhador.hora⁹⁶, como propõe Grayson (2001), para este tipo de contexto).

Face à utilização de diferentes unidades de medida para cada uma das duas situações mencionadas (sintetizadas no quadro 3.3), a produtividade, neste contexto, é determinada pela adição daqueles dois contributos parcelares, em moldes que adiante se definirão.

Quadro 3.3 – Produtividade – Contexto mineiro real (variáveis, índice e métricas)

		Unidade
Variáveis	Tempo Fora da Tarefa (TFT)	min
	Diminuição de ritmo (DR)	ton/[equipa.min]
Índice	WBGT	°C

• Contexto experimental

Nos ensaios realizados na câmara climática, a produtividade é estimada através da quantificação de parâmetros metabólicos que se relacionam com o desempenho físico dos voluntários submetidos às simulações. Neste caso, os indivíduos, sujeitos a atmosferas térmicas controladas⁹⁷, executam exercícios físicos que simulam a atividade mineira real em termos metabólicos, sendo-lhes medido o índice de massa corporal (IMC), o ritmo cardíaco (RC), a temperatura corporal interna (TCI) e o consumo de oxigénio (VO₂máx). Analogamente ao proposto para o contexto mineiro, quando o indivíduo atinge uma TCI igual ao valor limite superior de referência, um RC definido para a sua idade e condição física ou se atingem os períodos máximos de trabalho para cada nível do índice WBGT (ver anexo 2.3), o ensaio deve ser interrompido. Do tempo de paragem (TFT) - ocasionado por uma dessas três vias e medido pela diferença entre a duração estimada para o ensaio⁹⁸ e o

⁹⁶ Esta unidade será alterada de ton/trabalhador.hora para ton/equipa.min, de acordo com as observações seguintes.

⁹⁷ Variando a temperatura e a humidade do ambiente, analogamente aos ensaios produzidos por Zhao, Zhu e Lu (2009).

⁹⁸ No caso, 2 horas.

tempo decorrido até à interrupção - resultará um custo, correspondente ao decréscimo de produtividade.

Quanto à componente de diminuição de ritmo (DR), esta é, neste caso, medida pela redução da velocidade do ergómetro de ensaio, em m/s, por forma a estabilizar os parâmetros metabólicos (TCI, RC) ou o consumo máximo de oxigénio ($\text{VO}_2\text{máx}$)⁹⁹ em torno de valores alvo. Note-se que a velocidade do ergómetro é regulada ‘externamente’, servindo de parâmetro de controlo e medição do ritmo de execução das atividades, ao qual corresponde um determinado nível de produtividade, por comparação com a situação considerada normal¹⁰⁰. No ponto 3.2.3 e capítulo 4, este procedimento será revisitado e complementado.

Analogamente ao indicado para o contexto mineiro, também aqui a produtividade (ou a sua diminuição) é a soma das duas parcelas referidas. A síntese das variáveis consideradas é apresentada no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Produtividade – Contexto experimental (variáveis, índice e métricas)

		Unidade
Variáveis	Tempo Fora da Tarefa (TFT)	min
	Diminuição de ritmo (DR)	m/s
Índice	WBGT	°C

Concluída a descrição dos modos preconizados para a medição dos índices, variáveis e unidades a adotar para as três grandezas apresentadas na figura 3.4 (ambiente térmico, segurança e produtividade) – que constituem a primeira fase de resolução da questão, como indicado no início deste ponto – segue-se a apresentação esquemática dos modelos de relacionamento entre aquelas grandezas, propostos para concretizar a influência do ambiente térmico na segurança e produtividade, em articulação com o esquema da referida figura (3.4).

Para esse propósito, observem-se as expressões e figuras seguintes, onde se sintetizam e representam as metodologias a adotar no relacionamento entre todas as variáveis em análise.

Como anteriormente se definiu, o ambiente térmico é quantificado através do índice WBGT, o qual é determinado com base nos valores de temperatura de bolbo húmido (t_{bh}) e temperatura de globo (t_g) dos espaços considerados¹⁰¹. Analiticamente, este índice é calculado através da equação 2.3 que aqui se recapitula:

⁹⁹ $\text{VO}_2\text{máx}$ é, aliás, proposto por Donoghue e Bates (2000a) como parâmetro de análise do risco de exaustão térmica.

¹⁰⁰ Velocidade máxima (padrão), em condições de ambiente térmico que não afete o ritmo de desempenho humano ($T_a=20^\circ\text{C}$ e $H_r = 60\%$).

¹⁰¹ Expressão válida para espaços interiores, como é o caso das aplicações em causa.

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{bh} + 0,3 t_g$$

(Eq. 3.1)

Após caracterizado o índice de ambiente térmico (WBGT) e reapresentada a sua respetiva expressão de cálculo, a influência deste fator na segurança ocupacional é traduzida na figura 3.7¹⁰², onde se representa qualitativamente a tendência esperada para essa interação, de acordo com a informação aceite e publicada.

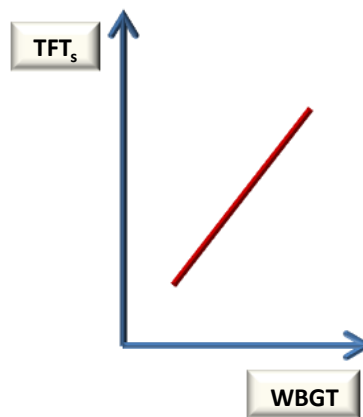


Figura 3.7 – Relação ambiente térmico / segurança

em que o TFT_s é o tempo fora da tarefa apenas devido a acidentes laborais que se possam associar às condições de ambiente térmico (WBGT) e que obrigam o trabalhador a interromper a sua atividade.

No plano da produtividade, os diagramas qualitativos a considerar para a tradução do efeito do ambiente térmico são apresentados em dois grupos, respeitantes a:

- *Paragens de trabalho*, originadas por se atingir uma TCI real elevada ou pelos períodos de descanso definidos na ISO 7243: 1989. Em ambos os casos, a consequência é a tradução num tempo fora da tarefa, que se designa por TFT_p (ver figura 3.8), em que o índice p se refere à produtividade, por oposição ao índice s , utilizado para definir a mesma variável quando relativa aos aspetos de segurança (acima). Neste caso, a apresentação é válida para qualquer dos contextos de aquisição de dados que se venham a adotar no desenvolvimento posterior;
- *Diminuição do ritmo de trabalho*, devido à adaptação autónoma do indivíduo, em condições de calor. Este aspeto é referido, separadamente, para cada um dos contextos enunciados (experimental ou real) (figura 3.9), em virtude da métrica a utilizar, em cada caso, ser distinta.

De notar que na figura 3.8 são apresentadas as duas origens do TFT, sendo de salientar que as mesmas são mutuamente exclusivas, isto é, para uma dada situação, a causa a considerar é a que primeiro atinge o valor limite estabelecido, não sendo cumulativas. O valor de TCI

¹⁰² Semelhante à figura 3.6, anteriormente apresentada e que aqui se reformula, com outra designação sequencial.

pode ser preponderante relativamente ao definido na ISO 7243: 1989 (ou vice-versa), consoante a situação concreta em análise.

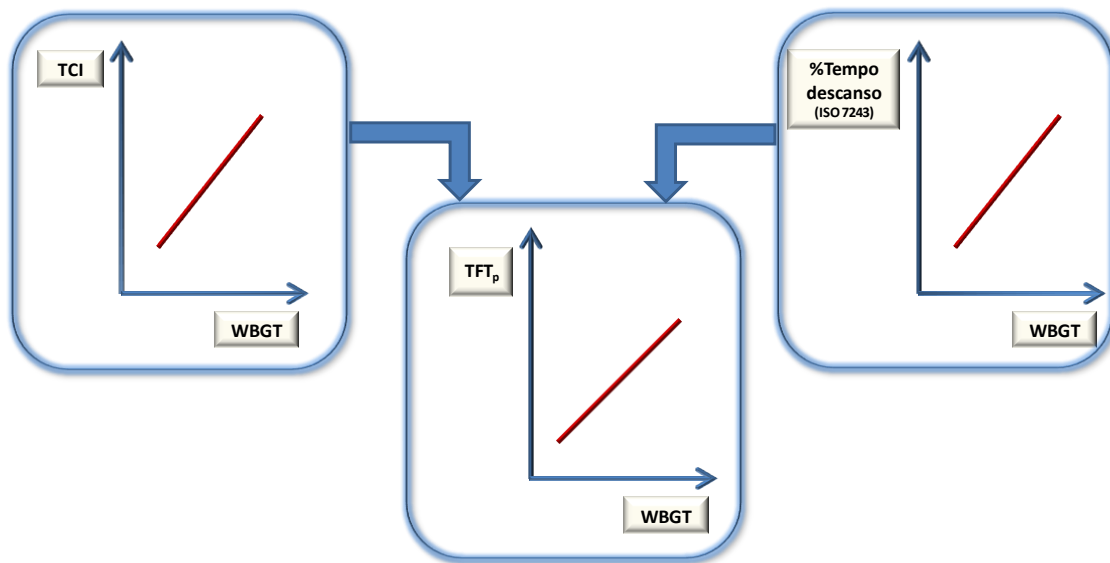


Figura 3.8 – Relação ambiente térmico / produtividade, devido a paragem de trabalho

Portanto, quando se atinge um dos valores referência, ocorre a paragem de atividade do indivíduo, o que permite a tradução dessa paragem num TFTP, nos termos da exposição anterior. A possibilidade de se atingir o segundo limite referido é, deste modo, inviabilizada.

Para quantificar a diminuição do ritmo de trabalho propõe-se, como metodologia, o estabelecimento das relações apresentadas nos diagramas da figura 3.9:

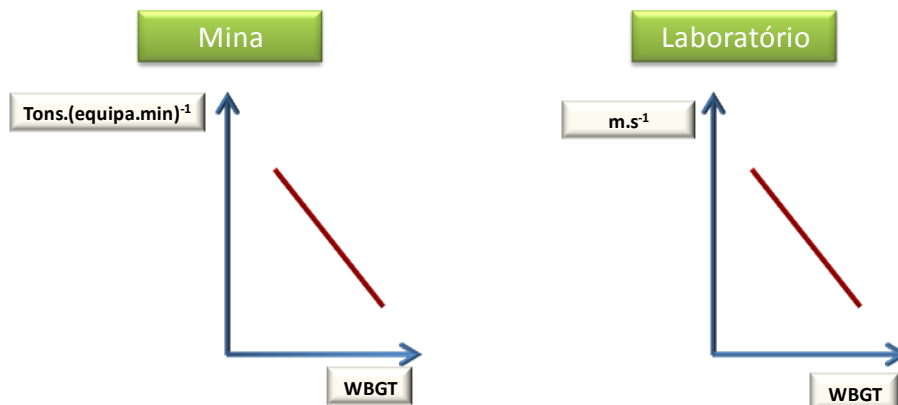


Figura 3.9 – Relação ambiente térmico / produtividade, devido a diminuição do ritmo de trabalho

Na monitorização da atividade mineira associa-se a diminuição de ritmo de trabalho à redução da quantidade produzida, (em toneladas), enquanto para as simulações produzidas na câmara climática a mesma grandeza é medida pela redução de velocidade do ergómetro de ensaio, para cada WBGT, de modo a estabilizar os valores dos parâmetros metabólicos

(consumo de oxigénio, ritmo cardíaco, temperatura corporal interna) em torno de valores pré-estabelecidos.

Ambas as situações são quantificadas fazendo variar o índice WBGT, resultando no estabelecimento das funções qualitativas, cujas ‘tendências’ expetáveis se representam na figura 3.9.

Na apresentação precedente descreveram-se, qualitativamente, as metodologias e relações a estabelecer para se concretizar, por um lado, a medição das grandezas de interesse e, por outro, as relações entre elas. A descrição da aplicação concreta será efetuada nos capítulos seguintes, em conjunto com a enumeração dos materiais e instrumentos a utilizar na prossecução do trabalho, de acordo com o contexto de aquisição de dados considerado. Note-se que em toda a exposição antecedente, se adotou uma visão global em torno das formas preconizadas para a recolha de dados, estabelecendo-se um quadro metodológico base, abrangente, que permite responder globalmente às especificidades de cada um dos contextos enunciados.

3.2.2 Metodologias/objetivo O2

No plano do relacionamento entre as condições de ventilação e os valores das variáveis térmicas (ex.: temperaturas bolbo húmido e de globo), nos locais de estudo, poder-se-á optar por diferentes abordagens - com dimensões e objetivos finais distintos - em dois níveis de observação (micro e macro), que se esquematizam na figura 3.10.

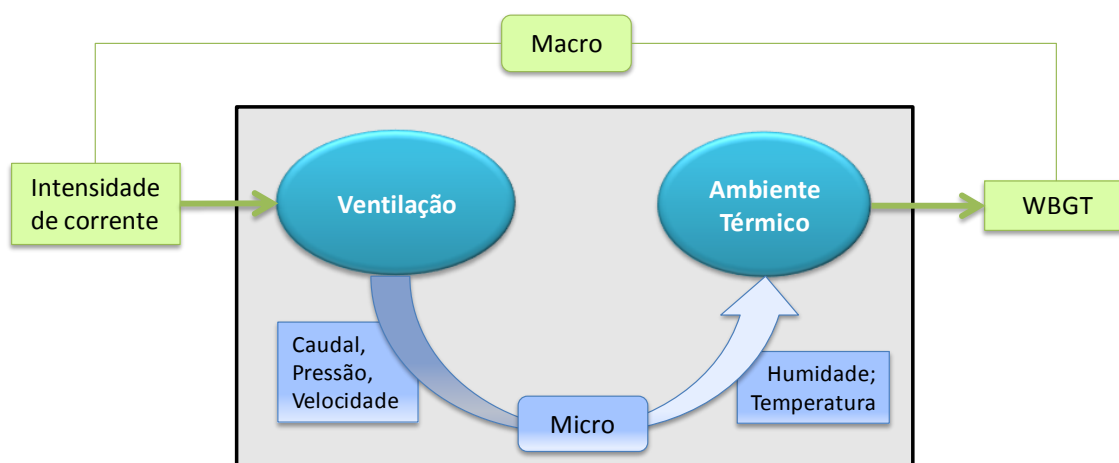


Figura 3.10 – Relação ventilação / ambiente térmico (micro e macro)

Na visão *macro*, considera-se que o retângulo com fundo cinza, no diagrama, representa uma ‘caixa negra’, cujo interior não será objeto de análise. Nesta perspetiva, apenas se considera uma variável de entrada (intensidade de corrente) e o seu efeito na variável de saída (WBGT) (‘circuito’ exterior, representado a verde), independentemente do processo que ocorre internamente.

Ao invés, numa ótica *micro*, foca-se a análise ao nível das variáveis internas do processo, de modo a identificar o efeito particular dos parâmetros do ar fornecido pelo sistema de ventilação (ex.: caudal, velocidade) no valor das variáveis térmicas (ex.: humidade, temperatura), tomadas individualmente (fluxo interno, na caixa negra).

A escolha da perspetiva mais ‘interessante’, depende do objetivo que se pretende atingir. Por exemplo, no desenho de um sistema de ventilação novo, a instalar numa mina, será necessário avaliar o plano *micro*, de modo a definir as características técnicas (ex.: caudais e velocidades de ar a fornecer) dos equipamentos a seleccionar, de acordo com os requisitos do projeto. Por outro lado, se se considerar uma instalação existente onde:

- i) Não se prevê a necessidade de alteração das características técnicas do sistema de ventilação existente;
- ii) É desnecessário conhecer os valores absolutos dos atributos do ar à saída do ventilador;
- iii) Para se atingir o objetivo desejado, apenas é relevante a medição dos efeitos da ventilação no ambiente térmico, em termos globais;

então, um outro ângulo de análise, em que se medem apenas os efeitos globais – o designado *macro* – deverá ser o seleccionado.

Face às considerações anteriores, considera-se que esta última opção metodológica (macro) é a mais adequada para aplicação no presente estudo, porquanto:

- O âmbito do trabalho não envolve a selecção dos equipamentos que compõem o sistema de ventilação das minas ou o sistema de condicionamento de ar da câmara climática;
- A medição em cada patamar de funcionamento, apenas, da intensidade de corrente (variável de entrada) que atravessa o circuito de alimentação dos equipamentos dos sistemas de ventilação secundário (minas), ou de condicionamento de ar (câmara climática), é tecnicamente facilitada e simplificada, por comparação com a medição dos parâmetros necessários na abordagem alternativa;
- Para um dado equipamento de ventilação, refira-se, a título de exemplo, que o caudal fornecido em cada limiar de funcionamento é proporcional à intensidade de corrente ‘consumida’ (I)¹⁰³. Nesse sentido, a medição desta variável, reflete o efeito global pretendido, não sendo necessário ‘descer’ ao nível ‘*micro*’;
- A variável de saída é quantificada pelo índice WBGT, pelo que o efeito da ventilação que interessa obter é o reflexo induzido no índice e não em cada uma das variáveis parcelares que integram a expressão para a sua determinação¹⁰⁴;
- A definição das condições de ventilação através de uma única variável facilita a sua conversão em unidades monetárias, tema a abordar seguidamente;

Em suma, a metodologia proposta para a monitorização da relação entre ‘ventilação’ e ‘ambiente térmico’ assenta na medição, simultânea, da intensidade de corrente absorvida pelos equipamentos em cada estágio do seu funcionamento e, do índice WBGT,

¹⁰³ A que corresponde uma potência ($P = \Delta V \cdot I$) que apenas varia com I, visto a rede elétrica nacional fornecer uma diferença de potencial constante, fixada em $\Delta V = 230V$.

¹⁰⁴ Ver considerações anteriores sobre o assunto (figura 3.5).

correspondente a cada uma dessas condições, o que permitirá delinear a função de relacionamento entre ambos.

3.2.3 Metodologias/objetivo O3

Neste ponto, aborda-se a questão da tradução dos valores das variáveis relevantes nos seus correspondentes valores económicos. Desde logo, é de referir que a mensuração em unidades monetárias - conforme se esquematizou na figura 3.1 - se aplica apenas às variáveis ‘finais’, ou seja, as que avaliam os estádios de funcionamento do sistema de ventilação e os níveis de segurança e produtividade que lhes correspondem. Este contexto está subjacente à definição do objetivo O3, ao qual se dirigem as metodologias que seguidamente se enunciam. As restantes variáveis - relativas ao ambiente térmico e/ou ao metabolismo (figura 3.1) - são consideradas instrumentais para a obtenção dos resultados finais pretendidos, pelo que não existe qualquer interesse ou necessidade nas suas conversões, motivo pelo qual são aqui excluídas.

Observe-se, então, o quadro 3.5, onde se sintetizam as unidades anteriormente definidas para cada uma das variáveis representativas das grandezas de interesse:

Quadro 3.5 – Síntese de unidades finais

		Unidade
Ventilação	Intensidade de corrente (I)	A
Segurança	Tempo fora da tarefa (TFT _s)	min
	Tempo fora da tarefa (TFT _p)	min
Produtividade	Diminuição de ritmo (mina)	ton/[equipa.min]
	Diminuição de ritmo (câmara)	m/s

Face à diversidade de unidades observada, as metodologias a aplicar para as transformar em unidades monetárias serão, também elas, forçosamente diferenciadas. Nesse sentido, descrevem-se seguidamente os métodos propostos para as conversões, considerando as respetivas especificidades particulares, iniciando-se pela ventilação.

A intensidade de corrente (I), enquanto parâmetro de medição do patamar de funcionamento do sistema de ventilação secundário (mina) ou de condicionamento de ar da câmara climática (laboratório), é uma das variáveis que intervêm no cálculo da potência consumida pelos equipamentos, a qual se determina pela expressão¹⁰⁵:

$$\text{Potência (W)} = \Delta \text{ Potencial (V)} * \text{Intensidade (A)}$$

(Eq. 3.2)

¹⁰⁵ Exemplo para circuitos monofásicos.

Considerando que a diferença de potencial é constante¹⁰⁶, a potência varia proporcionalmente com a intensidade, pelo que a relação entre as duas grandezas é monótona e unívoca. Consequentemente, o consumo de energia (kWh) – medido pela potência consumida ao longo de um período de tempo – é faturado, pelo fornecedor de energia elétrica, através da multiplicação da quantidade consumida pela tarifa¹⁰⁷ que representa o custo unitário da energia utilizada (u.m./kWh). A conversão do valor de intensidade (Ampère) em unidades monetárias, como pretendido, resulta da aplicação da expressão de determinação da potência, cujo resultado é multiplicado pelo tempo de utilização em carga dos equipamentos e pelo custo unitário de energia.

$$\text{Custo (u.m.)} = [U(V) * I(A)/1000] * t(h) * \text{Custo unitário (u.m./kWh)} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

em que:

$U(V)$ – Diferença de potencial, medida em Volt (V);

$I(A)$ – Intensidade de corrente, medida em Ampere (A);

1000 – Fator de conversão (W para kW);

$t(h)$ – Tempo utilizado, medido em horas (h);

Custo unitário (u.m./kWh) – tarifário de comercialização de energia pelo fornecedor.

Tratada a questão da ventilação, passa-se à apresentação da metodologia de conversão da unidade seguinte (de entre as referidas no quadro 3.5) que, no caso, se designa por *tempo fora da tarefa* (TFT).

É de salientar que essa medida é utilizada para mensurar aspetos, quer de segurança, quer de produtividade. Independentemente da causa que origina a paragem de produção, a consequência é, em ambos os casos, idêntica: quebra de produção. Nesse sentido, as quebras de produção - para fins de tradução em valores monetários - não serão diferenciadas para cada uma das componentes TFT_s e TFT_p , por conseguinte, a designação TFT, utilizada ao longo do texto seguinte sobre este tema, refere-se indiscriminadamente a qualquer uma das parcelas.

Uma segunda nota, para se evidenciar a necessidade de se estabelecer um referencial prévio, que tipifique a forma de contabilização do défice de produção associado ao TFT, no contexto do trabalho.

Veja-se que se pretende converter um tempo de inatividade, num valor de ‘custo’. Para tal, será necessário considerar variáveis intermédias - como sejam, por exemplo, a quebra na quantidade produzida (associada ao TFT) e o seu valor económico - que estabeleçam a ‘ponte’ entre as unidades de entrada (tempo) e de saída (u.m.).

¹⁰⁶ No espaço nacional, é estabelecida pelo fornecedor de energia elétrica (230 V).

¹⁰⁷ 0,1418 u.m./KWh, para baixa tensão normal (BTN) e potências contratadas ≥ 6.9 KVA. Em vigor desde janeiro 2013, Diretiva ERSE n.º 16/2012. Informação disponível em: <http://www.edpsu.pt/PT/PARTICULARES/TARIFASEHORARIOS/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>, acedido a 14 de junho de 2013.

Para concretizar essa ligação é inevitável estabelecer um conjunto de pressupostos que alicercem as opções a adotar na estimativa dos valores unitários a aplicar, os quais posteriormente se enunciam.

Considere-se, como ponto de partida, a noção de que a produção obtida numa exploração mineira depende do trabalho realizado pelos operários que integram o setor de produção da empresa (capacidade laboral disponível) e que aquela pode ser contabilizada em diferentes unidades (kg, Ton, €) e distintos horizontes temporais (hora, dia, semana, mês ou ano).

Partindo deste entendimento geral, descreve-se, seguidamente, o método que se propõe para determinação da produção/produtividade (ou das suas variações), em termos económicos, referindo e desagregando os diferentes fatores que o integram, em concreto:

- **Trabalhadores/Equipas de trabalho**

No plano organizacional, pode conceber-se uma empresa como um conjunto integrado de departamentos e/ou funções (representados no *puzzle* da figura 3.11), que se conjugam para dar resposta às necessidades inerentes ao seu funcionamento e desenvolvimento.



Figura 3.11 – ‘Puzzle’ organizacional

Numa perspetiva holística, poder-se-á considerar que todas as funções são imprescindíveis para a atividade da empresa. No entanto, no âmbito do presente estudo, iremos focar a atenção no grupo de trabalhadores que compõem o setor de produção (peça destacada no *puzzle*, figura 3.11) e que executam as suas atividades no interior das minas, rodeados por um ambiente térmico adverso e condicionante dos respetivos desempenhos.

Esses operários são os responsáveis pela extração de minério, pelo que se poderá indexar a produção ao número e produtividade dos trabalhadores que integram esse setor, conforme se esquematiza na figura 3.12.

Depreende-se da figura que, numa visão assente exclusivamente nos recursos humanos, o nível de produção depende do número de trabalhadores envolvidos e das suas respetivas produtividades.

Um segundo aspeto a considerar será a forma como o ambiente térmico afeta a produtividade de uma equipa de trabalho, numa dada frente de desmonte.

É de notar que o surgimento de condições de stresse térmico obriga a que os trabalhadores parem a laboração durante determinados períodos de tempo¹⁰⁸, com a consequente perda de produtividade laboral.

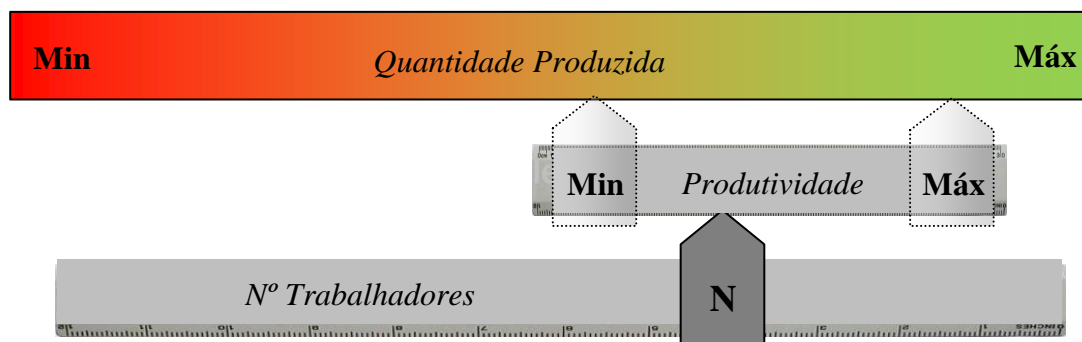


Figura 3.12 – Relação produção, produtividade e número trabalhadores

Aparte diversos outros fatores¹⁰⁹, a ocorrência desse problema depende do esforço físico empreendido pelo trabalhador no exercício das tarefas que lhe estão cometidas. A esse dispêndio de energia corresponde uma classe de taxa metabólica (CM) específica, a qual é distinta para cada binómio indivíduo/tarefa (ver anexo 3.1)¹¹⁰.

Assim, para o desenvolvimento subsequente, surge então o seguinte obstáculo:

- Numa frente única de trabalho, em que opera uma equipa constituída por diversos trabalhadores, sujeitos ao mesmo ambiente envolvente mas com tarefas distintas e, consequentemente, classes de taxa metabólica diferentes, qual a temperatura de referência (T_{ref}) a definir como valor limite?

Para contornar essa dificuldade, a opção metodológica adotada é a de considerar o valor de T_{ref} correspondente à CM associada ao trabalhador para o qual as condições globais sejam mais exigentes e críticas. Nesse caso, o período de descanso - caso o mesmo se verifique necessário - terá a maior duração, de entre todos os valores suscetíveis de serem determinados individualmente, para cada trabalhador da equipa. Esta estratégia garante, por um lado, que nenhum dos trabalhadores de uma mesma equipa possa vir a estar sujeito a condições que excedam os limites estipulados e, por outro, que a equipa trabalhe coesa e equilibrada, aplicando-se as pausas de trabalho simultaneamente a todos os membros, de modo a evitar períodos de descanso individuais distintos, o que seria de difícil gestão e controlo.

Complementarmente, a opção referida também permite que as medições se centrem apenas num trabalhador da equipa (aquele que está sujeito às condições de trabalho mais severas), o que facilita o processo de aquisição de dados, no terreno. Será nesse mesmo trabalhador

¹⁰⁸ Em função de serem atingidas as temperaturas limite de referência (TCI ou WBGT) (ver ponto 3.2.1.3).

¹⁰⁹ Vestuário, aclimação, hidratação, entre outros.

¹¹⁰ Anexo relativo às classes de taxa metabólica (ISO 7243: 1989).

que será monitorizada a temperatura corporal interna (TCI), através da cápsula/sensor de temperatura que irá ingerir para o efeito. Este procedimento garante a recolha de dados de temperatura corporal na pessoa ‘mais exposta’ e, simultaneamente, efetuar as medições com a utilização de apenas um sensor/equipa, o que, no plano económico, se traduz na minimização de custos de monitorização a produzir.

Em suma, os valores de referência determinados, no plano individual, para o trabalhador em situação mais crítica, são posteriormente aplicados, de forma generalizada, a toda a equipa que opera na frente trabalho em análise (figura 3.13).

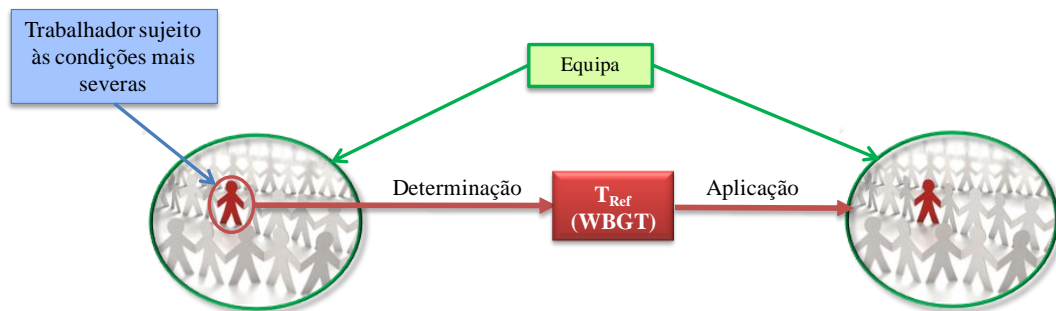


Figura 3.13 – Temperatura de referência para a equipa de trabalho

Portanto, a observação de apenas um trabalhador por equipa é, pelo exposto, um procedimento económico e tecnicamente justificado, pelo que deve ser o adotado no desenvolvimento posterior.

• Custo unitário e conversão em valor (u.m.)

Como profusamente se tem referido, em diversos momentos, ao longo do presente texto, pretende-se quantificar a ‘segurança’ e ‘produtividade’ em unidades monetárias (u.m.). Para essa finalidade, considera-se essencial encontrar uma expressão de cálculo de um custo unitário de produção, que servirá de coeficiente multiplicador, no processo de obtenção do ‘custo’ global relativo às quebras de produção.

Nesse sentido, é necessário indicar a forma como se procederá para atingir tal resultado, tendo em consideração duas visões alternativas (*despesa* ou *receita*), para obtenção do ‘custo’ global, como seguidamente se sintetiza:

- ✧ *Despesa*, representando os custos associados aos salários dos trabalhadores do departamento de produção;
- ✧ *Receita*, na perspetiva de decréscimo de proveitos, pela diminuição da quantidade de produção comercializada no mercado.

As parcelas e sequência de cálculo a considerar, para a alternativa ‘*despesa*’, são:

- i. Massa salarial (MS): valor global dos custos anuais de remuneração dos trabalhadores do setor de produção (vide figura 3.11), desagregado por categorias profissionais (k);

- ii. Número de trabalhadores (N_Trab): identificação do número total de trabalhadores de cada categoria profissional, a que corresponde a massa salarial indicada em *i*;
- iii. Equipas (N_Equipa): número de equipas e sua composição operacional, expressa em número de trabalhadores, por categoria profissional;
- iv. Número de turnos diários executados por uma equipa, no período de um ano (Turnos/equipa): equivalente ao número de dias úteis de trabalho/equipa;
- v. Minutos de produção diárias disponíveis (T_Prod_Dis): tempo de produção disponível de cada equipa, excluindo períodos de deslocação para e entre frentes de trabalho;

de onde resultam:

- vi. Custo por trabalhador de uma categoria profissional (Custo_{tcp}):

$$\text{Custo}_{tcp(K)} = \frac{\text{Massa salarial da categoria } k}{N^{\circ} \text{trabalhadores da categoria } k} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

- vii. Custo de uma equipa, por turno diário (Custo_{equipa}):

$$\text{Custo}_{equipa} = \left(\sum_{k=1}^n (\text{Custo}_{tcp} * N^{\circ} \text{Trab})_k \right) / (\text{Turnos}/\text{equipa}) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

com k = categorias profissionais que integram uma equipa

- viii. Custo unitário de uma equipa (Custo/[equipa.min]):

$$\text{Custo}/[\text{equipa.min}]_t = \frac{\text{Custo}_{equipa}}{T_{\text{Prod_Disp}}} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

O valor final obtido (Eq. 3.6) representa o custo unitário ‘teórico’ de cada minuto de produção de uma equipa ‘standard’.

No pressuposto de que a massa salarial e a constituição das equipas são invariantes, ao longo do ano, a alteração de produtividade, medida com base no TFT, corresponde a um custo unitário real acrescido (índice ‘r’) (distinto do teórico, índice ‘t’), pela via da diminuição do tempo de trabalho efetivo em relação ao disponível, o qual pode ser traduzido pela expressão:

$$\text{Custo}/[\text{equipa.min}]_r = \frac{\text{Custo}_{equipa}}{T_{\text{Prod_Disp}} - \text{TFT}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

que reflete o custo final associado ao custo de mão-de-obra (salário), por equipa e unidade de tempo, em função do parâmetro TFT medido para avaliar a segurança e produtividade.

Numa abordagem análoga, para a alternativa de obtenção de custos unitários pelo lado da *receita*, obtemos:

- i. Produção, em valor (ProdValor): volume anual¹¹¹ de vendas (u.m.);
- ii. Equipas (Nº Equipas): número médio de equipas a operar no setor de produção, ao longo do ano;
- iii. Turnos (Nº Turnos): Número anual de turnos diários de uma equipa, equivalente ao número de dias úteis de trabalho/equipa;
- iv. Minutos de produção diárias disponíveis (T_Prod_Dis): tempo de produção disponível, por cada turno de uma equipa, excluindo períodos de deslocação para e entre frentes de trabalho;

resultando no valor de produção por equipa, turno e minuto (Prod_Min):

$$\text{Prod_Min} = \frac{\text{ProdValor}}{N^{\circ}\text{Equipas} * N^{\circ}\text{Turnos} * T_{\text{Prod_Disp}}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Neste caso, o cálculo da perda económica (quebra de vendas) associada aos TFT é obtida, de forma direta, pela multiplicação desse tempo de imobilização pelo valor de produção unitário, determinado pela equação 3.8.

Apresentadas as visões gerais para determinação do ‘custo unitário’, numa análise comparativa entre elas, é de salientar que:

- Os valores de produção globais serão tendencialmente mais ‘estáveis’ do que a massa salarial, cuja estrutura de cálculo envolve várias componentes (ex.: abonos, deduções, subsídios, remunerações complementares, impostos) e categorias profissionais (com remunerações distintas, mesmo dentro de cada grupo), fatores que introduzem eventuais distorções no resultado e dificultam a sua determinação;
- A rotação de trabalhadores das várias categorias profissionais, ao longo do ano, dificulta o estabelecimento e utilização de valores de massa salarial médios, a usar como base no cálculo unitário pretendido;
- O valor de venda da produção é calculado, diretamente, pela análise da faturação da empresa, o que simplifica o processo de obtenção de informação na ‘fonte’.

Face ao exposto e de acordo com a simplicidade de aplicação evidenciada pela alternativa centrada na *receita*, julga-se ser preferível a utilização dessa abordagem.

Em síntese, os TFT - medidos em minutos - serão convertidos em unidades monetárias, multiplicando-os pelo valor unitário de produção que resulta da aplicação da expressão designada por equação 3.8. Portanto, a um período de paragem de laboração (TFT) de uma equipa (tomada como unidade elementar), independentemente de ser ocasionado por ‘problemas’ indexados a aspetos de segurança ou de produtividade, ocorre um decréscimo de produção e, conseqüentemente, diminuição de receitas, ambas proporcionais aquele

¹¹¹ O horizonte de tempo pode variar (mensal, diário), dependendo da informação disponível. A utilização de outros períodos de tempo, apenas afetam os coeficientes ou ponderadores de cálculo, mantendo-se a metodologia apresentada, sem perda de generalidade.

tempo de improdutividade. Essa quebra de proveitos equivale ao custo que se pretende identificar, dando-se, assim, por finalizada a apresentação da metodologia para cálculo do custo unitário, em que se baseia a conversão do TFT (de tempo para unidades monetárias), no contexto da atividade mineira.

Ainda sobre este tema, uma referência sobre a conversão do TFT, no âmbito da atividade desenvolvida no interior da câmara climática. Nessas condições, não existe uma produção de quantidades físicas mensuráveis, nem um montante económico de mercado que possa ser utilizado para encontrar um valor unitário, análogo ao determinado para a situação de produção real.

Propõe-se, então, uma outra abordagem, que consiste em previamente quantificar a perda de produtividade como uma função do TFT, em percentagem do tempo total disponível. Aliás, todos os estudos quantitativos observados (representados no diagrama da figura 2.6) traduzem a perda de rendimento em valores percentuais, por comparação com uma situação inicial, de partida, em condições de ambiente normal, pelo que a adoção desta métrica é suportada pelos referidos trabalhos, não sendo inédita.

Complementando a descrição anteriormente realizada numa perspetiva indicativa (ver ponto 3.2.1.3), sobre a medição da produtividade no contexto dos ensaios realizados na câmara climática, efetua-se neste momento uma análise mais ‘fina’ sobre o assunto, estabelecendo-se, *a priori*, os seguintes pressupostos:

- As condições de ambiente térmico recriadas no interior da câmara climática simulam as condições reais existentes nas frentes de trabalho de minas subterrâneas;
- A duração média das operações ininterruptas a simular é de D^{112} ;
- Os critérios de paragem de atividade no decurso dos ensaios - idênticos aos definidos para o contexto real - foram anteriormente apresentados períodos de descanso estipulados em função do valor do índice WBGT¹¹³, ser atingido o ‘valor limite’ para a TCI ou para o RC. A paragem acontece para a primeira situação que ocorra;
- Os períodos de paragem são medidos pela variável TFT.

A produtividade (P) pode então ser determinada, em percentagem (%), por:

$$P (\%) = \left(1 - \frac{TFT}{D} \right) * 100\% \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Os valores que resultam da aplicação da equação 3.9 medem a redução de produtividade em relação à situação ‘normal’ ($P = 100\%$), para a qual as condições de ambiente térmico não condicionam o desempenho dos indivíduos. A utilização do fator D , como ponderador de TFT, pretende replicar as condições reais e, simultaneamente, limitar a duração dos ensaios a esse período de tempo.

¹¹² Baseado numa recolha informal de dados, junto de responsáveis da Somincor (mina de Neves Corvo), considerando atividades sujeitas a ambientes térmicos adversos (ex.: furação da bancada, carregamento frentes), o valor de D é de 2 horas/120 minutos.

¹¹³ Estipulados na norma ISO 7243.

Estabelecida a relação entre o TFT e a produtividade para a situação de recolha de dados em ambiente laboratorial, será necessário, por fim, estabelecer as suas conversões em u.m. Sobre esse aspeto, para os propósitos do presente estudo, vislumbram-se duas alternativas de ‘condições iniciais’, complementares e dirigidas a finalidades distintas:

- i. Obter a produção unitária no setor mineiro, em valor (em u.m.), conforme indicado, pela aplicação da equação 3.8 e considerar esse valor como correspondente a $P = 100\%$, ou seja, $TFT = 0$.
O valor da produtividade ‘real’ ($TFT > 0 \Rightarrow P < 100\%$), em termos absolutos, é calculado pela multiplicação desse valor unitário ‘padrão’ pelo valor de P , resultante dos ensaios e determinado pela expressão 3.9. Em termos relativos, a variação de produtividade será determinada pela diferença entre este último e o valor considerado normal ($P = 100\%$);
- ii. Obter a escala de custos de energia elétrica, em função do consumo do equipamento de condicionamento de ar da câmara climática (ver ponto 3.2.2), atribuindo-se ao *tempo fora da tarefa* (TFT) um valor económico da mesma ordem de grandeza daquele custo.

Para qualquer destas alternativas, a produtividade é convertida no seu respetivo valor económico, conforme pretendido.

Como observações às duas opções descritas, pode salientar-se que:

- Para eventuais comparações¹¹⁴ futuras com resultados reais a obter por medição no interior das minas, a escolha da primeira opção (i) coloca os valores de ambos os cenários na mesma dimensão, o que facilita a análise. No entanto, esse procedimento não é imprescindível para essa finalidade, podendo optar-se por efetuar a conversão inversa, isto é, medir, em percentagem, as variações de produtividade ocorridas em ambiente mineiro, para as comparar com os resultados obtidos laboratorialmente;
- A escolha de uma escala da ordem de grandeza dos custos de energia (ii), permite que as variações de custos, em sentidos contrários (energia e produtividade), sejam de igual proporção, o que se reflete num aumento de ‘sensibilidade’ da resposta do modelo de otimização que integra essas parcelas, na fase de testes a que este será submetido.

Das duas opções, a que melhor se adequa aos objetivos pretendidos é a segunda (ii), pelo que será a adotada. Este assunto será revisitado e detalhado na apresentação subsequente, relativa à construção e teste do referido modelo (cap. 4), onde melhor se justificará a escolha agora apontada.

De acordo com a sequência de grandezas e unidades expressas no quadro 3.5, para finalizar a apresentação acerca da conversão de unidades, subsiste por abordar a vertente ‘diminuição de ritmo’, para ambos os ambientes de recolha de dados.

Iniciando-se a exposição pela atividade mineira, a unidade proposta para contabilizar a diminuição de ritmo, nesse contexto, é ton/(equipa.min). Interessa, neste caso, obter o valor (u.m.) da produção física realizada (ton) por cada equipa, na unidade de tempo, o que se

¹¹⁴ Esta análise comparativa transcende o âmbito do presente trabalho. Será, no entanto, interessante, para uma fase de desenvolvimento futuro, após conclusão deste estudo.

obtem, diretamente, multiplicando-a pelo valor de venda de minério no mercado (ex.: €/ton). De notar que a diminuição de ritmo é medida pelo valor (u.m.) da diferença entre a produção dita ‘normal’ e a obtida em condições de ambiente térmico adverso, sendo esta a metodologia de cálculo seguida.

Nas simulações executadas na câmara climática, a mesma grandeza é computada em m/s. Analogamente ao referido para a conversão dos TFT nessa realidade, também esta parcela deve ser contabilizada de forma relativa, em percentagem do valor considerado para um ritmo de trabalho normal. À velocidade de execução da atividade, corresponderá a seguinte produtividade P (%):

$$P (\%) = \left(\frac{\text{velocidade ergómetro}}{\text{velocidade padrão do ergómetro}} \right) * 100\% \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Obtido o valor de produtividade (ou da sua variação), a conversão para u.m. será operada de modo idêntico ao proposto para o TFT do mesmo contexto, ou seja, recorrendo à alternativa de ‘condições iniciais’ designada por *ii* (acima), que se consubstancia na utilização de uma escala comparável com a dos custos de energia elétrica.

Concluiu-se, assim, a exposição sobre os métodos preconizados para a transformação, em unidades monetárias, de cada uma das unidades indicadas no quadro 3.5 (relativas ao ambiente térmico, segurança e produtividade).

Como nota final sobre este ponto, reforça-se a ideia de que as conversões aqui focadas são passos fundamentais para a construção do modelo global a estabelecer (ponto 3.2.4, seguinte). Note-se que, a adição dos efeitos das variáveis parcelares, num mesmo modelo, apenas é possível se aquelas forem medidas em unidades idênticas, o que evidencia a importância vital deste aspeto. A agilização prática dos processos de recolha de dados e respetivas conversões, baseadas nas metodologias aqui expostas, serão objeto de apresentação nos capítulos 4 e 5.

3.2.4 Metodologias/objetivo OG

O âmago deste ponto é a descrição da proposta de metodologia para o estabelecimento de um modelo que reflita a interdependência e relações causa/efeito entre os diversos fatores elencados nos subpontos antecedentes.

Genericamente, pretende-se que o modelo a construir permita avaliar a relação custo/benefício entre o valor gasto com energia elétrica (ventilação) e o seu retorno nas condições de segurança e produtividade dos indivíduos expostos ao ambiente térmico considerado.

Abre-se aqui um parêntesis, centrado no contexto de atividade real, para se clarificarem os pressupostos e características dos sistemas de ventilação para controlo do ambiente térmico, quanto à sua tipologia, forma e modo de atuação.

O ambiente térmico (temperatura e humidade) no interior de uma mina é condicionado pelo caudal e distribuição de ar introduzido/extraído no interior das suas galerias, pelos

sistemas de ventilação existentes, perspectiva que está em consonância com o papel definido para a ventilação, referido em Vutukuri e Lama (2010). Num outro estudo, desenvolvido por Talaia e Rodrigues (2006), é referido que condições apropriadas de ventilação podem anular o desconforto térmico e consequente stresse térmico do trabalhador. Nessa investigação é também evidenciado o interesse e importância do controlo dos sistemas de ventilação, quer como forma de controlo ambiental de espaços interiores, quer como instrumento de melhoria da eficiência energética e dos índices de produtividade.

De acordo com a importância atribuída à ventilação, pelos referidos autores, tome-se como exemplo um sistema de ventilação mecânica, onde o controlo dos parâmetros enunciados depende do número e tipo de ventiladores em funcionamento e da regulação da velocidade de rotação que lhes é imposta, a cada momento. Assim, no tipo de unidades industriais em estudo (minas), a modificação das condições ambientais internas é exclusivamente realizada pelo controlo e atuação dos sistemas de ventilação instalados¹¹⁵.

Consequentemente, é conveniente explicitar a arquitetura geral dos sistemas de ventilação (SV) no interior de uma mina subterrânea, em articulação com as necessidades ou exigências da atividade aí executada. Para tal, ir-se-á considerar a sua subdivisão em dois grupos distintos e complementares, designados por sistema de ventilação principal global (SVPG) e sistema de ventilação secundário localizado (SVSL):

- O sistema global, SVPG, é constituído pelo grupo de ventiladores (exaustores) que asseguram a insuflação (extração) de ar exterior (interior) no interior (exterior) das galerias das minas. É, pois, o sistema responsável pela quantidade de ar global trocada com o ambiente exterior e que atravessa todo o espaço da exploração mineira. Trata-se, geralmente, de um sistema de elevada dimensão, pelo que frequentes variações nos seus parâmetros de funcionamento não serão desejáveis, nem eficazes, atendendo a três ordens de razões: uma primeira, no plano técnico, relacionada com a inércia associada a sistemas eletromecânicos de grande porte, que conduz a um atraso na ‘resposta’ às alterações dos seus parâmetros de funcionamento, operadas através da unidade de comando e controlo. Uma segunda, de efeitos semelhantes à anterior, associada às características das instalações. A modificação da quantidade de ar insuflada pelo SVPG, à entrada, repercute-se na rede de galerias da mina com grande ‘atraso’, principalmente nas zonas mais distantes do ponto de entrada. Essa situação é tão mais crítica, quanto maior for a extensão e complexidade dimensional da exploração mineira em causa. Por último, um terceiro elemento a considerar é a necessidade de quantidades e caudais de ar diferenciados em locais específicos da exploração. Neste caso, a alteração operada no sistema global não permite a adequação às diferentes necessidades localizadas, sendo inviável o controlo ambiental de cada local específico por essa via.
- O sistema de ventilação secundário, SVSL, é o responsável pela condução da quantidade de ar necessária a locais com exigências e especificidades distintas do geral, como sejam as frentes de desmonte, onde se opera em situação que,

¹¹⁵ Situação análoga ocorre para a câmara climática.

usualmente, se designa por ‘fundo de saco’. Aí, a renovação de ar promovida pelo sistema de ventilação principal é insuficiente, sendo necessária a utilização de meios auxiliares complementares que conduzam o ar à frente de trabalho.

Esse será o campo de atuação do designado sistema de ventilação secundário localizado (SVSL), o qual é constituído por ventiladores axiais de impulso aos quais se acoplam mangas de distribuição que irão permitir o transporte do ar até ao ‘fundo de saco’. O processo consiste na captação de ar nas galerias principais, a montante, e impulsioná-lo pelo SVSL para as zonas pretendidas. O ar é, posteriormente, devolvido de novo à galeria principal, a jusante. Este sistema ligeiro, instalado no local, de fácil controlo e resposta rápida, permite adequar a quantidade de ar necessária à criação de apropriadas condições ambientais nessas zonas críticas de trabalho.

É de notar que os locais em apreço são os pontos de maior criticidade da instalação, em termos térmicos, de concentração de poluentes ambientais e de necessidade de renovação de ar, pelo que as medidas para se garantir o cumprimento das normas relativas à qualidade mínima requerida para o ar e ao conforto térmico dos trabalhadores são, aí, mais exigentes, por comparação com outras zonas da instalação. Acresce a esse facto, existir uma elevada percentagem de trabalhadores que permanecem nesses locais, tornando o problema incontornável.

A categorização anterior dos sistemas de ventilação permite identificar as funções principais associadas a cada um dos dois tipos identificados. Sumariamente:

O SVPG é responsável por garantir as trocas globais de ar entre o espaço subterrâneo e a envolvente exterior.

Deverá garantir o caudal global a introduzir no interior das minas, de forma contínua e estável.

Para melhor visualização desta ideia, o SVPG poderá ser comparado, no atletismo, a ‘um corredor de fundo’, a quem se requer um desempenho duradouro e estável, durante um amplo período de tempo, o qual não possui características que lhe permitam mudanças de ritmo com elevadas frequências ou amplitudes, privilegiando-se a continuidade e resistência;

Ao contrário, o SVSL por ser constituído por equipamentos de gama ligeira, colocados próximo dos locais onde intervêm, de atuação e resposta rápidas, são adequados ao controlo ambiental de zonas confinadas, com taxas de renovação de ar mais exigentes e variáveis. A operação destes sistemas não altera o valor dos caudais globais (a cargo do sistema principal), apenas redireccionando, localmente, parte desse caudal para os pontos onde se verifica ser mais necessário. Usando idêntica analogia (atletismo), o SVSL pode ser comparado a ‘um corredor de velocidade’, a quem se associa rapidez e capacidade de mudança rápida de ritmo. Para estes, privilegia-se a versatilidade e celeridade de resposta.

Na sequência da descrição das características e respetivo campo de aplicação dos SVPG e SVSL, é de referir que no âmbito do estudo que se pretende desenvolver, o sistema que se irá considerar e controlar será o sistema de ventilação secundário

localizado, SVSL. É aquele que condiciona, diretamente, as condições ambientais dos postos de trabalho mais críticos.

Nesse sentido, interessa monitorizar as variáveis ambientais e as suas repercussões na produtividade e segurança dos trabalhadores, nas frentes de trabalho mineiro, através do controlo local das condições aí existentes. Ora, só os SVSL intervêm a esse nível, pelo que deverão ser os instrumentos prioritários e únicos de atuação.

Obviamente, esta abordagem pressupõe que o sistema principal assegure, de forma estável, os caudais globais necessários ao funcionamento geral da mina, situação que resulta do desenho inicial da instalação (projeto) e que se pressupõe ser atingido, com sucesso.

Fechando o parêntesis relativo aos SV e retomando o tema central, pode referir-se que o modelo que se pretende construir, agrupa as três componentes principais que se representam na figura 3.14, as quais, por sua vez, integram a informação recolhida na pesquisa bibliográfica - quanto ao *know-how* e conhecimento atual sobre essas temáticas (*‘estado de arte’*) – e nas considerações e desenvolvimentos anteriores.

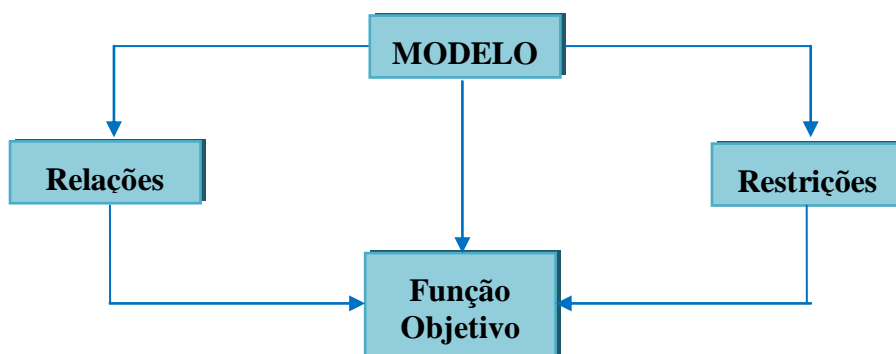


Figura 3.14 – Componentes do modelo

O modelo contemplará o seguinte grupo de conteúdos, dentro de cada uma das ‘caixas’ indicadas:

- **Relações:** funções que definem as relações existentes entre as grandezas “consumo de energia” / “condições de ambiente térmico” / “metabolismo” / “custos de segurança e produtividade”¹¹⁶, de cuja conjugação resulta o estabelecimento da função final pretendida, que relaciona o “consumo de energia” com os “valores de segurança e produtividade”. Essas relações, de um ponto de vista qualitativo, foram já enunciadas¹¹⁷;
- **Restrições:** estipular valores limite (máximos e/ou mínimos) para as variáveis utilizadas, garantindo que o modelo operará dentro de fronteiras adequadas, que reflitam o espectro de condições reais ou aceitáveis para os espaços de trabalho;

¹¹⁶ Sequência análoga às apresentadas nas figuras 1.4 e 3.1, relativas, respetivamente, às hipóteses e objetivos definidos.

¹¹⁷ Vide gráficos das figuras 3.6 a 3.9.

- Função Objetivo: o consumo energético e o seu reflexo na segurança e produtividade (referida no grupo ‘relações’) constituirá a função objetivo a minimizar.

Em suma, o modelo integra a informação relativa à influência entre as variáveis consideradas de interesse para o estudo, adota as restrições que proporcionam a sua adequabilidade ao contexto real, culminando na materialização de uma função objetivo (FO) que traduz a relação custo/benefício entre as grandezas. A resolução do problema será concretizada pela minimização de custos totais, ou seja, pela otimização da FO.

Após clarificação da estrutura e constituintes do modelo - instrumento central a utilizar na aplicação prática - é essencial recolher um conjunto de dados, que caracterizem as situações reais onde irá incidir o estudo.

Numa primeira fase, será fundamental obter uma ‘fotografia’ do estado inicial do ‘sistema’, através da recolha simultânea (no posto de trabalho ou na câmara climática, conforme o caso em consideração) dos valores relativos aos seguintes elementos¹¹⁸:

- Ambientais: medição dos parâmetros que permitam determinar o valor de WBGT, índice utilizado para caracterizar as condições de ambiente térmico¹¹⁹;
- Contexto: analisar e classificar o tipo de tarefa ou atividade (esforço e dispêndio energético) mais exigente¹²⁰ e o vestuário¹²¹ (isolamento e permeabilidade térmica) utilizado pelos indivíduos alvo de observação¹²²;
- Metabólicos: medição de parâmetros metabólicos diferenciados, para cada uma das formas previstas de obtenção de dados¹²³;
- Energéticos: medição da intensidade de corrente¹²⁴ consumida pelos sistemas de ventilação e correspondente consumo energético¹²⁵.
- Segurança e Produtividade: quantificar os níveis de segurança¹²⁶ e produtividade¹²⁷ associados às atividades e condições atuais.
- Perceção térmica: através de resposta a um inquérito (modelo no anexo 3.3), recolher a sensação térmica percebida por cada indivíduo nas condições de operação (instrumento complementar, opcional).

Uma referência a este último aspeto: os estudos relativos a condições de ambiente térmico adversas, associados a um quadro de ‘problemas’ de stresse térmico, não utilizam, usualmente, ‘ferramentas’ do género da indicada (inquéritos de sensações térmicas), considerando-se que a aplicabilidade destas se restringe apenas a ambientes térmicos moderados.

¹¹⁸ Referem-se apenas descrições sintéticas para cada categoria, remetendo a sua forma de obtenção para anexos ou pontos anteriores, onde essas metodologias foram elencadas, evitando-se assim as suas repetições.

¹¹⁹ Conforme descrição no ponto 3.2.1.1.

¹²⁰ Conforme categorias expressas no Anexo 3.1 (ISO 7243).

¹²¹ Conforme coeficientes definidos no Anexo 3.2 (ISO 7730).

¹²² Na lógica do esquematizado na figura 3.13.

¹²³ Ver, a esse propósito, as descrições apresentadas no ponto 3.2.1.3.

¹²⁴ Vide ponto 3.2.2.

¹²⁵ Vide ponto 3.2.3.

¹²⁶ Vide ponto 3.2.1.2.

¹²⁷ Vide ponto 3.2.1.3.

A atmosfera típica no interior de minas configura uma situação do primeiro tipo. No entanto, novas abordagens, como a proposta por Talaia e Rodrigues (2008), postulam que, para a avaliação de um posto de trabalho em ambientes industriais, não só é importante a determinação do valor do índice WBGT, como também o conhecimento da percepção ou sensação térmica dos trabalhadores. É nesta ‘linha de pensamento’ que se insere a proposta de aplicação de inquéritos que utilizam a escala de 7 níveis de Fanger¹²⁸, com carácter opcional, nesta avaliação inicial. Trata-se da recolha de um tipo de dados que não é central para o desenvolvimento do presente estudo. Porém, a aplicação dos referidos inquéritos, caso seja possível, resulta na obtenção de um manancial de dados importante, para utilização futura, permitindo complementar a avaliação da situação, através da comparação entre dados percecionados (subjetivos) e índices medidos (objetivos), o que potencia o estabelecimento de uma eventual correlação entre os dois tipos de dados, a qual, a existir, reforçará a coerência e consistência da informação obtida.

O conjunto de dados recolhidos, nesta primeira fase, permitirá identificar a situação de partida e parametrizar os valores iniciais das variáveis do modelo, adequando-o à realidade que pretende modelizar.

É de notar a importância da definição dessas condições iniciais, as quais diferem de aplicação para aplicação, por exemplo, em função das tecnologias utilizadas (ex.: consumos de energia diferenciados) ou, mesmo, do valor de mercado do minério (ex.: u.m./ton). Um outro aspeto também a realçar, é o facto de o processo de otimização do modelo ser baseado numa análise custo/benefício entre as variações de consumo de energia e as correspondentes alterações de produtividade (e não nos seus valores absolutos), donde se depreende a necessidade de uma parametrização inicial, que funcione como um conjunto de valores ‘âncora’, a partir dos quais se determinam as alterações dos valores das variáveis.

Numa segunda fase, a partir da ‘fotografia’ inicial, procede-se a alterações paramétricas de ‘estado’, ou seja, das condições de funcionamento do sistema de ventilação associado à frente de trabalho ou à câmara climática em monitorização e quantificam-se as variações produzidas nas grandezas de ambiente térmico, bem com a sua repercussão na segurança e produtividade dos trabalhadores afetados.

Fica, assim, concluída a exposição relativa à sequência das duas fases de implementação do modelo: uma inicial, estática (fotografia inicial) que nos fornece a situação vigente e, outra, posterior, dinâmica (variações paramétricas), que nos conduz a uma solução otimizada para o problema.

Uma nota final acerca dos conteúdos específicos do modelo. Face à sua relevância, no âmbito do presente estudo, entendeu-se desejável abordá-los em separado, em espaço próprio, pelo que se remete a descrição detalhada das funções, restrições e função objetivo¹²⁹ para o capítulo respetivo, seguinte.

¹²⁸ Escala proposta para os inquéritos a utilizar no modelo de Fanger, para avaliação do conforto térmico através dos índices PMV e PPD.

¹²⁹ Esquematizadas na figura 3.14.

4. MODELIZAÇÃO

No presente capítulo, alude-se à constituição formal do modelo que traduz as relações entre as grandezas de interesse para o estudo, as quais se esquematizam na figura 4.1.

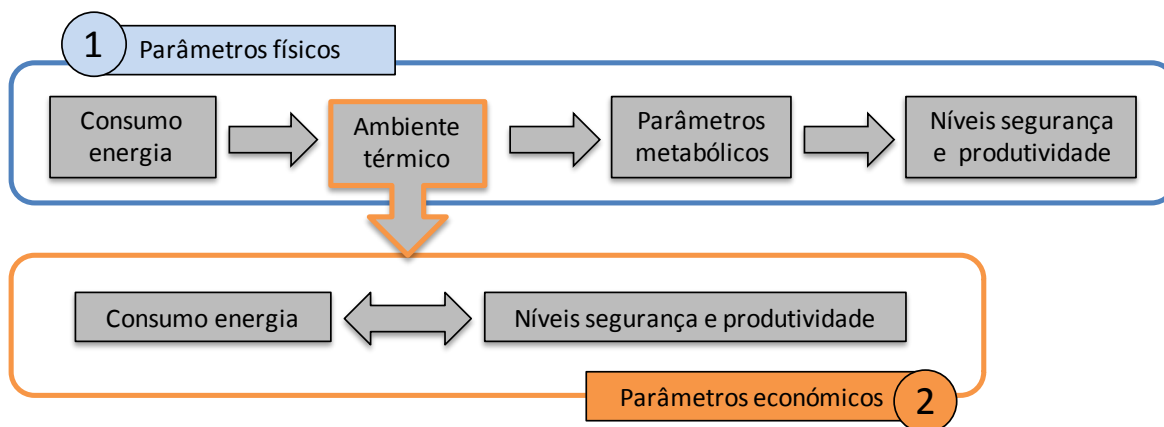


Figura 4.1 – Parâmetros físicos e económicos do modelo

A metodologia adotada para a sua descrição é a de apresentar, num primeiro momento, o modelo conceptual de carácter geral para, num momento seguinte, se quantificarem as funções que o integram num plano específico e particular. Esta estratégia faculta, desde logo, uma visão geral da génese e arquitetura do modelo teórico proposto, remetendo-se para uma fase seguinte a concretização das funções e aspetos que o materializam e adaptam às implementações práticas previstas. Julga-se que a apresentação subdividida em duas fases – do geral para o particular – facilita a leitura, compreensão e acompanhamento do desenvolvimento do modelo, o que justifica esta opção.

Iniciando-se a exposição pelo mencionado plano geral, refira-se que o modelo a desenvolver incide sobre a quantificação física do relacionamento entre variáveis ambientais (térmicas), condições de ventilação, metabolismo e níveis de segurança e produtividade, em ambientes de características quentes e húmidas, de acordo com o esquematizado no grupo 1 da figura 4.1.

Numa fase seguinte (figura 4.1, grupo 2), transformam-se os valores físicos das variáveis de interesse nos seus correspondentes valores económicos (unidades monetárias).

Saliente-se que as condições de ambiente térmico - avaliadas pelo valor do índice de stresse térmico, *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT) - são o elemento central de ligação com as restantes. Nessa ótica, as variações de valores das outras variáveis serão estipuladas como funções dos valores do índice WBGT, em cada momento de medição e análise considerados. Esta ideia, evidenciada na figura 4.1 pela ligação entre valores físicos (grupo 1) e económicos (grupo 2), através da grandeza ‘ambiente térmico’, é também responsável pelo modo de relacionamento adotado entre os valores de consumo de energia elétrica e os patamares de produtividade e segurança ocupacionais (figura 4.1 – grupo 2) resultantes.

O modelo final integra a globalidade das funções referidas, permitindo a avaliação da relação custo/benefício entre o consumo energético e a produtividade e segurança ocupacionais. A sua estrutura geral é esquematizada no diagrama apresentado na figura 4.2, onde se distinguem dois grupos de funções:

- A, relativas às relações das diferentes variáveis intermédias com o índice WBGT;
- B, relativas à obtenção dos custos parcelares, que se adicionam para a determinação do custo global.

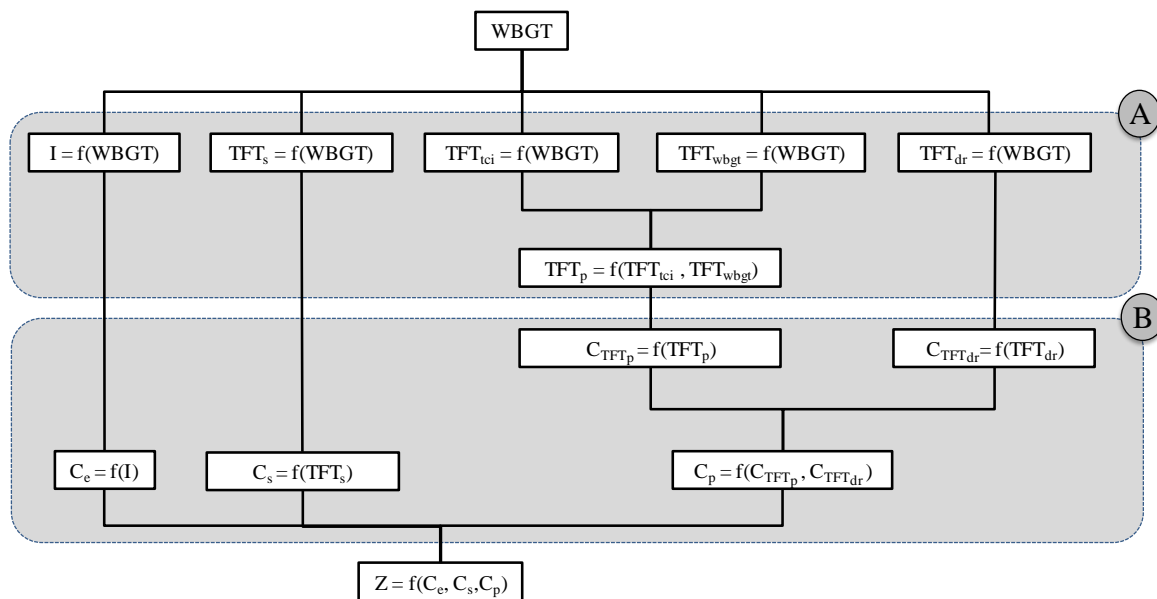


Figura 4.2 – Estrutura global do modelo

Da análise da figura 4.2 observa-se que:

- O índice WBGT é a variável independente de entrada (*input*);
- Z (custo global) é a variável dependente de saída (*output*);
- O modelo ‘transforma’ o *input* WBGT, no *output* Z, através de um processamento em duas vertentes interligadas:
 - *física*, computando as relações entre as variáveis instrumentais (I, TFT)¹³⁰ e o índice WBGT (fig. 4.2, A);
 - *económica*, pela determinação dos custos associados a cada uma das três parcelas: energia, segurança e produtividade (fig. 4.2, B).

Apresentadas as características genéricas do modelo, a descrição detalhada da globalidade das funções que o constituem - elencadas nas fases A e B da figura 4.2 - será realizada a seguir, individual e separadamente, para cada variável instrumental (I, TFT) e tipologia de custos (energia (C_e), segurança (C_s) e produtividade (C_p))¹³¹.

Antecedendo a concretização dessas descrições, introduz-se uma nota para se referir que o controlo de poluentes ambientais (poeiras, gases) é realizado por aplicação de

¹³⁰ Vide capítulo 3: “I” (Intensidade de corrente) e “TFT” (Tempo Fora da Tarefa).

¹³¹ Ver definições no ponto 4.1.

procedimentos de monitorização e controlo atmosférico, que garantam a manutenção de concentrações de gases e poeiras em níveis desejáveis.

Trata-se de um aspeto colateral ao desenvolvimento do modelo em análise, mas cuja relevância é incontornável, de um ponto de vista prático, mormente em situações em que os processos e equipamentos de produção induzam maior ‘pressão’ ambiental, de que é um bom exemplo a atividade mineira subterrânea (vide ponto 2.2.3). No anexo 4.1, a título ilustrativo, são desde já apresentados dois fluxogramas exemplificativos (um global e outro específico) dos procedimentos desenvolvidos para análise e controlo desses fatores, garantindo-se a salvaguarda da qualidade do ar interior, em qualquer dos espaços (mina ou câmara climática) a observar.

Concluída a observação anterior e retomando a apresentação do modelo, segue-se a descrição detalhada dos pressupostos adotados e dos modos de ‘construção’ das funções, de cuja agregação resultará o modelo global final.

Com o objetivo de estruturar a exposição, adota-se a sequência de passos esquematizada na figura 4.3, a qual, aliás, está em consonância com os elementos indicados na figura 3.14 do capítulo anterior.



Figura 4.3 – Sequência de passos na apresentação detalhada do modelo

Note-se que as funções que integram os grupos A e B da figura 4.2 constituem o grupo designado por ‘restrições funcionais’ da figura 4.3.

Genericamente, numa primeira fase, é necessário definir as variáveis que integram o modelo para, seguidamente, se estabelecer a função objetivo a minimizar (custos). Numa fase seguinte, serão considerados os dois tipos de constrangimentos existentes, nomeadamente, os que se referem às relações entre as variáveis (restrições funcionais) e os que são relativos à exigência de não negatividade das variáveis consideradas (restrições de sinal).

4.1 Variáveis principais

De acordo com a sequência estabelecida (figura 4.3), começa-se pela definição das variáveis fundamentais.

Sejam:

- C_e – Custo de energia elétrica, associado ao consumo do sistema de ventilação/condicionamento de ar, medido em unidades monetárias (u.m.);

- C_s – Custo de acidentes de trabalho, ocorridos devido à existência de um ambiente térmico, no posto de trabalho, de características “quente e húmido”, medido em unidades monetárias (u.m.);
- C_p – Custo do decréscimo de produtividade (%), devido à realização de tarefas em ambiente quente e húmido, medido em unidades monetárias (u.m.);
- $WBGT_i$ – Índice de stresse térmico, determinado por medição dos parâmetros térmicos ambientais, em cada situação ($i = 0, \dots, n$), quantificado em $^{\circ}\text{C}$;
- TFT_p – Tempo fora da tarefa, medido em minutos, devido a serem atingidos os limites de temperatura corporal ou ambiental que conduzem à paragem temporária de atividade (produtividade);
- TFT_s – Tempo fora da tarefa¹³², medido em minutos, devido à ocorrência de acidentes, incidentes ou quase-acidentes que originam paragem de atividade (segurança);
- DR_p – Diminuição do ritmo de produção, medido em m/s ou tons/trab.hora, conforme a aplicação, associado ao aumento da fadiga / cansaço inerentes às condições de ambiente térmico (produtividade);
- I – Intensidade de corrente que atravessa o circuito de alimentação do sistema de ventilação, medido em Ampére (A);
- Z – Função custo total, medida em unidades monetárias (u.m.).

É de referir que aqui se apresentam apenas as variáveis consideradas mais importantes, numa perspetiva geral, ou seja, as que se relacionam entre si, para se determinarem os custos finais que integram a função final a otimizar. Há, no entanto, um extenso grupo de outras variáveis instrumentais que são essenciais para a determinação das anteriores. Com o objetivo de facilitar a perceção do grupo de variáveis instrumentais a utilizar em cada passo, optou-se por fazer as suas descrições ao longo do texto, junto das expressões em que intervêm. Esta escolha metodológica permite associá-las aos cálculos intermédios necessários ao processo, de acordo com a sua especificidade e oportunidade, numa tentativa de criar condições facilitadoras à leitura e perceção dos fatores intervenientes, no momento em que são considerados.

O conjunto completo das *variáveis* (fundamentais e instrumentais) e das *constantes* utilizadas no desenvolvimento do modelo, será listado quando se proceder à síntese do modelo global (ponto 4.11).

4.2 Função objetivo

Definidas as variáveis principais, sucede-se o estabelecimento da função objetivo que, neste caso, é representada por uma função “custo global” que se pretende minimizar. As

¹³² Para efeitos de cálculo do índice de gravidade considera-se que um acidente mortal representa a perda de 7500 dias de trabalho, de acordo com uma resolução da 6ª Conferência Internacional de Estatística do Trabalho da OIT, disponível em <http://www.ilo.org/global/lang-en/index.htm>, acedido em 4 de Maio de 2013. Analogamente, no presente contexto, um acidente mortal corresponderá a um TFT (min) de 7500 dias x 8 horas = 3.600.000 min.

parcelas que integram a dita função correspondem às contribuições, para o custo, das componentes “energia elétrica”, “segurança” e “produtividade”, com a seguinte tradução algébrica:

$$Z = C_e + C_s + C_p \quad (\text{Eq. 4.1})$$

de onde resulta a função objetivo:

$$\text{Min } Z = \text{Min } [C_e + C_s + C_p] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Os custos representados na função objetivo são determinados através de funções que os relacionam com variáveis intermédias, estimadas ou medidas, conforme se referiu no capítulo precedente. A materialização dessas funções - que concretizam o designado grupo de restrições funcionais - é o objeto da descrição seguinte, efetuada em separado, para cada variável.

Nessa exposição apresentam-se, inicialmente, os modos preconizados para a determinação dos custos associados a cada nível de ambiente térmico estável (WBGT constante). Posteriormente, essas expressões serão indexadas às variações dos valores do índice de stresse térmico, permitindo avaliar as suas correspondentes variações relativas.

4.3 Custo “energia” (C_e)

O custo de energia elétrica é determinado pelo produto entre a energia consumida e o respetivo valor unitário, estipulado no tarifário do fornecedor¹³³. Para o obter, analiticamente, utiliza-se o seguinte conjunto de expressões e sequência de cálculo:

$$Pot = \frac{\Delta U \cdot I}{1000} \quad (kW) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

em que:

Pot – Potência elétrica consumida (kW);

ΔU – Diferença de potencial da rede elétrica (V);

I – Intensidade de corrente elétrica (A);

1000 – Fator de conversão $W \Rightarrow kW$.

A quantidade de energia elétrica (E_e) consumida é dada por:

¹³³ Estimado em 0.1418 u.m./kWh (ver ponto 3.2.3).

$$E_e = Pot . t \quad (kWh)$$

(Eq. 4.4)

em que:

t – Tempo de serviço (horas).

Finalmente, o custo de energia elétrica resulta:

$$C_e = E_e . C_{eunit} \quad (u.m.)$$

(Eq. 4.5)

em que:

C_{eunit} – Custo unitário de energia (u.m./kWh).

4.4 Custo “segurança” (C_s)

Para se avaliar o custo relativo à segurança, considera-se o tempo TFT_s e a sua conversão em unidades monetárias, conforme proposto, respetivamente, nos pontos 3.2.1.2 e 3.2.3. Note-se, no entanto, que nos cenários a considerar para desenvolvimento, teste e aplicação do modelo - câmara climática ou atividades em contexto real, nas minas - este custo será tendencialmente igual a zero, porquanto:

- A filosofia ‘zero acidentes’ está subjacente às atividades laborais e às condições de realização dos ensaios a propor. Para a execução de ensaios e medições, não é concebível sujeitar os intervenientes a situações que configurem risco de acidente. A preservação da integridade física dos voluntários (câmara climática) e dos trabalhadores (contexto mineiro) é um elemento essencial e imprescindível.

Face à dinâmica de evolução pretendida para o modelo, foram desenvolvidos ‘instrumentos’ no sentido de facultar a generalização da sua aplicação, permitindo a incorporação de informação complementar que venha a estar disponível, futuramente¹³⁴.

Nesse sentido, as funções a definir neste caso são:

$$TFT_s = N^o AIQA * TRecup_{Médio} \quad (min)$$

(Eq. 4.6)

em que:

¹³⁴ Na lógica, por exemplo, da tradução em TFT dos índices de incidência e gravidade associados ao ambiente térmico (vide ponto 3.2.1.2).

Nº AIQA – Número de acidentes, incidentes ou quase-acidentes ocorridos devido à exposição a ambientes térmicos quentes e húmidos (*vide* estatísticas disponíveis);

TRecup_{Médio} – Tempo médio de recuperação para reposição da situação normal de atividade/trabalho, medida em minutos.

Note-se que o número de minutos a contabilizar na variável TRecup_{Médio} é o correspondente ao tempo real de paragem de atividade e não o tempo total efetivo de recuperação. Esta ideia pode ser concretizada através do seguinte exemplo:

- Suponha-se que o tempo efetivo médio de recuperação é de dois dias, correspondente a 48 horas. Neste caso, o valor a considerar para a variável TRecup_{Médio} seria a conversão de 16 horas em minutos, correspondente a dois ‘turnos’ de ausência de atividade (8h/cada) e não as 48h iniciais (2 dias). Esta metodologia possibilita contabilizar apenas os tempos relevantes para a análise, isto é, os que realmente afetam as atividades (mina) ou ensaios (câmara climática).

Como se pode observar, a expressão proposta para determinar o TFT_s (eq. 4.6) deve ser aplicada para cada valor *individual* do WBGT, pois só desse modo será possível obter dados de TFT, cujas variações se possam associar às características de ambiente térmico. A sua exequibilidade depende da constituição de séries de dados extensas (plurianuais), que incluam, inequivocamente, a informação relativa às características de ambiente térmico (ex.: WBGT) que originaram o problema de segurança registado.

Contudo, se e quando esse tipo de informação estiver disponível, ela será incorporada no modelo através das expressões agora estipuladas. A criação desta possibilidade apoia a dinâmica de adaptação do modelo a novas realidades, por integração de novos dados que futuramente venham a surgir. Sobre este aspeto, é de referir que para efeitos de teste e análise de sensibilidade ao modelo global, serão considerados alguns pressupostos para a integração deste efeito, que adiante se enunciarão, de acordo com a informação disponível.

Descrita a forma genérica de obtenção do valor de TFT_s equivalente (eq. 4.6), a sua conversão em termos económicos é realizada de acordo com o referido no ponto 3.2.3, resultando como custo relativo à segurança (C_s) :

$$C_s = TFT_s \cdot C_{TFTunit} \quad (u.m.) \quad (Eq. 4.7)$$

em que:

C_{TFTunit} - Custo unitário TFT (u.m.)

Sobre este tipo de custos, referem-se aqui alguns comentários adicionais sobre os procedimentos propostos para a sua determinação, a saber:

- O custo C_s é apresentado em valor absoluto. Sempre que necessário, será utilizada a variação de custo, determinada por diferença em relação à situação inicialmente considerada, a qual pode corresponder a uma taxa de acidentes definida (C_s conhecido) ou à ausência de acidentes (C_s nulo);

- Os TFT_s também podem ser obtidos, alternativamente, pelo estabelecimento de correlações com os parâmetros metabólicos (ex.: temperatura corporal interna) do indivíduo. Essa opção não foi considerada por duas ordens de razões distintas: por um lado, porque a relação quantitativa entre os ‘níveis de atenção’¹³⁵ e os parâmetros metabólicos não se encontra bem definida, conforme indica Parsons (2009), que salienta a necessidade de se desenvolverem mais estudos sobre o tema e, por outro, porque a temperatura corporal interna (a medir continuamente através de sensor ingerível) irá ser utilizada para a definição dos *tempos fora da tarefa* associados à quebra de produtividade. Repare-se que a consequência do TFT - qualquer que seja a sua origem (relacionados com aspetos de segurança ou de produtividade) – é a perda de produção. Assim, se a temperatura corporal interna for utilizada para contabilizar a redução de produtividade, se o fosse também na perspetiva da segurança, estar-se-ia a duplicar um mesmo efeito;
- A determinação deste tipo de custo para a situação do contexto mineiro envolve cálculos distintos. Não sendo relevante o seu desenvolvimento no corpo principal do presente texto, focado no modelo global e genérico, apresenta-se - em complemento e a título ilustrativo, no anexo 4.2 - o modo como seria executado o cálculo do C_s no referido contexto, aspeto de especial interesse para aplicações nesse âmbito, em desenvolvimentos futuros.

4.5 Custo “produtividade” (C_p)

Analogamente ao realizado para as outras grandezas, neste ponto aborda-se a forma de obtenção do custo relativo à perda de produtividade associada às condições de ambiente térmico. De salientar, desde logo, que o decréscimo de produtividade pode ocorrer por duas vias, conforme anteriormente se expôs:

- Paragens de produção, associadas aos TFT_p definidos para as situações em que se atingem os limites pré-estabelecidos (temperatura corporal interna ou temperaturas de referência WBGT);
- Diminuição de ritmo de trabalho (DR_p), como resposta de adaptação autónoma do indivíduo ao excesso de calor (Kjellstrom, Holmer e Lemke 2009).

Os custos para cada uma destas situações são analisados e determinados separadamente, procedendo-se, no final, à adição dos seus efeitos para o estabelecimento da expressão do custo total correspondente à ‘produtividade’.

4.5.1 Custos associados a paragem de ‘produção’ (TFT_p)

A paragem de produção é aqui entendida como a paragem de atividade, a qual pode ser originada pelo facto do indivíduo ter atingido a temperatura corporal interna (TCI) ‘limite’ ou devida às condições de ambiente térmico existentes (WBGT), para as quais são

¹³⁵ Que se associam à fadiga cognitiva que, por sua vez, se associa à fadiga muscular.

prescritos períodos de descanso. Designem-se por TFT_{tci} e TFT_{wbgt} os tempos fora da tarefa, respetivamente, para cada uma dessas causas e considere-se ainda que¹³⁶:

- A duração dos ensaios é designada por D (vide ponto 3.2.3);
- São conhecidas as condições de circulação do ar, aclimação do voluntário e classe metabólica da atividade desenvolvida, necessárias para a seleção das temperaturas de referência (limite) do índice WBGT;
- A TCI máxima corresponde ao surgimento de câibras térmicas no indivíduo (representado pela aposição do índice 'c'), durante o ensaio, ou, alternativamente, a um valor considerado 'seguro' para o ser humano: 39°C ¹³⁷.

O tempo de atividade a considerar no ensaio será aquele que estiver indexado à TCI máxima que primeiro vier a ocorrer, ou seja, T_c para o surgimento de câibras térmicas ou T_1 se for atingida a $TCI = 39^{\circ}\text{C}$.

Este último aspeto pode ser concretizado através dos exemplos apresentados no diagrama da figura 4.4.

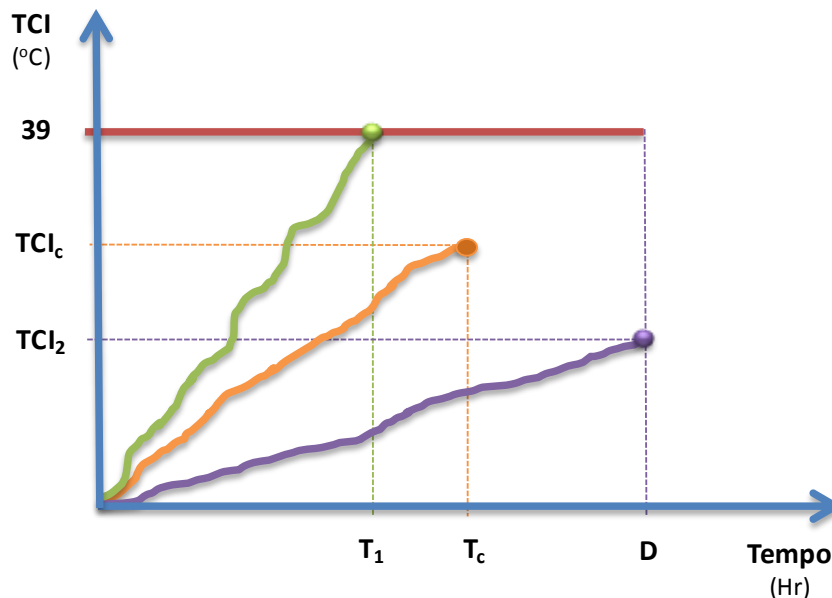


Figura 4.4 – Limites de temperatura corporal interna

Nesse diagrama exemplificam-se três situações, a que correspondem os seguintes limites para o valor da TCI:

- $TCI = 39^{\circ}\text{C}$ (linha verde). Durante o ensaio¹³⁸, o indivíduo atinge a temperatura corporal interna de 39°C , valor máximo estipulado. A atividade do ensaio é interrompida, decorrido o tempo correspondente a ser atingida essa situação (T_1);

¹³⁶ Tomando como exemplo a recolha de dados no contexto da câmara climática, de modo a facilitar a exposição, mas sem perda de generalidade. Eventuais adaptações às equações obtidas, para outros contextos de aplicação, serão posteriormente enunciadas.

¹³⁷ Guedes e Baptista (2011) indicam que o surgimento da exaustão térmica ocorre para temperaturas críticas variáveis, entre os 39°C e os 40°C . O valor mínimo foi adotado para minimizar esse risco nos voluntários submetidos aos ensaios.

- $TCI = TCI_c$ (linha cor-de-laranja). Ao fim do tempo T_c , o voluntário sente câibras térmicas. A atividade do ensaio é finalizada e a TCI limite é a correspondente TCI_c registada;
- $TCI = \text{'normal'}$ (linha roxa). O ensaio desenvolve-se sem que nenhum dos dois critérios anteriores seja atingido, pelo que o indivíduo cumpre a totalidade do tempo D , de duração máxima do ensaio, sem paragem.

Observados os critérios de determinação dos valores de referência para a temperatura corporal interna, os TFT_{tci} são calculados pela diferença entre a duração esperada para o ensaio (D) e o tempo decorrido até à interrupção da atividade (quando ocorra)¹³⁹. Para o exemplo da figura 4.4, resultaria:

$$TFT_{tci} = D - (T_1 \text{ ou } T_c \text{ ou } D) \quad (min) \quad (Eq. 4.8)$$

ou, genericamente:

$$TFT_{tci} = D - t \quad (min) \quad (Eq. 4.9)$$

em que t é o *tempo de atividade no ensaio*, que corresponde ao período decorrido entre o início do ensaio e a sua paragem.

Reforça-se a nota, já anteriormente referida, de que para o cálculo se escolhe o menor valor de duração da atividade do ensaio, isto é, o tempo correspondente à situação que primeiro ocorra ($TCI = 39^\circ C$ ou $TCI = TCI_c$).

Quanto à outra causa, relacionada com os valores de temperaturas de referência do índice WBGT (anexo 2.3), importa quantificar o designado TFT_{wbgt} . Para o efeito, é necessário avaliar, previamente, três fatores, de acordo com as seguintes escalas:

- Circulação forçada de ar no espaço de estudo: sim / não;
- Estado de aclimação dos indivíduos do estudo: aclimatados / não aclimatados;
- Classe metabólica da atividade desenvolvida: 0 (repouso)/ 1 / 2 / 3 / 4.

Para cada uma das combinações de valores possíveis para os três fatores supracitados, são definidos quatro valores de temperatura de referência WBGT, correspondentes às situações de trabalho contínuo e de três percentagens de tempo de trabalho/descanso (75%/25%, 50%/50% e 25%/75%), verificando-se que quanto maior é a 'temperatura' WBGT, maior será a percentagem de tempo de descanso necessária, como seria de esperar. Os valores concretos, caso a caso, são apresentados no anexo 2.3.

O procedimento a adotar pode ser sintetizado no seguinte exemplo, tomando como ponto de partida os valores constantes no quadro 4.1, que concretizam um possível grupo de

¹³⁸ Tempo de ensaio inferior a D .

¹³⁹ Note-se que para a situação representada a roxo, na figura 4.4, o TFT_{tci} é nulo.

estados/valores dos três fatores em consideração (ventilação sensível, estado de aclimação e nível de atividade metabólica).¹⁴⁰

Quadro 4.1 – Exemplo de valores para determinação da temperatura de referência WBGT

Fator	Estado/Valor
Circulação de ar sensível	Não
Indivíduos aclimatados	Sim
Classe metabólica da tarefa	3

Para esta combinação de estados e valores dos fatores, as correspondentes temperaturas de referência WBGT, obtidas no diagrama do anexo 2.3¹⁴¹, são:

Quadro 4.2 – Temperaturas de referência WBGT, para o exemplo

Nível de atividade	T _{ref}
Trabalho contínuo	25
75% Trabalho + 25% Descanso	27
50% Trabalho + 50% Descanso	29
25% Trabalho + 75% Descanso	31

Conhecidas as temperaturas de referência, procede-se à comparação destas com o valor do índice WBGT medido (real), de onde resulta uma das seguintes possibilidades:

- WBGT é menor que a T_{ref} correspondente ao trabalho contínuo (T_{ref} = 25°C, no exemplo). Neste caso, não existirá necessidade de paragem, ou seja, TFT_{wbgt} = 0;
- WBGT é superior ao maior valor de T_{ref} (no exemplo, 31°C). Para esta situação o trabalho é interdito, a que corresponde o valor máximo para o tempo fora da tarefa, isto é, TFT_{wbgt} = D (ausência de atividade, produtividade nula);
- WBGT medido está dentro do intervalo limitado pelos valores mínimo e máximo das temperaturas de referência. Neste caso, seleciona-se o nível de atividade que corresponde à T_{ref} de valor superior ao medido e que lhe seja mais próximo. Por exemplo, se o valor medido para o índice WBGT for 28°C, a T_{ref} a considerar é 29°C, a que corresponde uma percentagem de descanso de 50%.

O TFT_{wbgt} pode então determinar-se pelo produto do valor da percentagem do tempo de descanso pela duração prevista para o ensaio (D), resultando na expressão:

¹⁴⁰ A opção de escolha dos valores expressos no quadro 4.1 - como base para o exemplo a expor - teve como finalidade aproximar o exemplo das condições reais de trabalho no contexto mineiro.

¹⁴¹ Adaptado da tabela A1, do anexo A, da norma ISO 7243: 1989.

$$TFT_{wbgt} = D * (\% t_{descanso}) \quad (min) \quad (Eq. 4.10)$$

O tempo fora da tarefa para a ‘produtividade’ (TFT_p) é o maior - ou seja, o mais restritivo que primeiro se atinge - de entre os dois obtidos pelas expressões 4.9 e 4.10, o que se pode traduzir pela equação 4.11:

$$TFT_p = Máx [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}] \quad (min) \quad (Eq. 4.11)$$

Determinado o tempo fora da tarefa (TFT_p), para a componente ‘produtividade’ associada a paragens de atividade, o custo correspondente pode ser calculado de forma análoga à indicada para a parcela relativa aos aspetos de segurança (TFT_s) (ver eq. 4.7). Assim, utilizando os mesmos pressupostos, o custo C_{TFT_p} é dado por:

$$C_{TFT_p} = TFT_p \cdot C_{TFTunit} \quad (u.m.) \quad (Eq. 4.12)$$

A produtividade (%) associada à paragem de atividade resulta da utilização do valor TFT_p (eq. 4.11) na equação 3.9, ou seja:

$$P (\%) = \left(1 - \frac{TFT_p}{D}\right) * 100\% \quad (Eq. 4.13)$$

o que nos permite conhecer o valor da produtividade relativa (%) ou o seu decréscimo, por diferença, face à situação ‘normal’, de partida ($TFT_p = 0$, $P = 100\%$)¹⁴².

4.5.2 Custos associados a diminuição do ritmo de trabalho (DRp)

Para o cálculo do custo relativo a esta parcela, preconiza-se a adoção de um procedimento sequencial, em três passos¹⁴³:

1. Determinar o decréscimo de velocidade na execução da atividade (ergómetro), em relação à velocidade padrão, em termos percentuais;
2. Traduzir a percentagem de diminuição de ritmo, obtida no ponto anterior (1.), como uma redução equivalente de tempo TFT;
3. Converter o tempo TFT (min) em custo (u.m.), analogamente ao realizado no ponto anterior.

Esta estratégia aborda a diminuição do ritmo de trabalho como um *tempo fora da tarefa* equivalente. O pressuposto em que se baseia essa conversão é o de que a redução de ritmo

¹⁴² Valores importantes para aplicação e análise no contexto mineiro.

¹⁴³ Para facilitar a apresentação deste grupo de equações, tomou-se como exemplo e ponto de partida, novamente, o contexto laboratorial, sem perda de generalidade.

de trabalho corresponde a uma quebra de produtividade, o que, em termos práticos, tem a mesma consequência e custo que uma paragem de atividade (TFT). Analise-se, então, cada um dos três passos, pela ordem indicada, começando pela diminuição de velocidade de execução do ensaio.

Para tal, considere-se como ponto de partida a medição dos parâmetros metabólicos (TCI, $VO_{2m\acute{a}x}$, RC) do sujeito, ao longo de um ensaio em situação de ambiente térmico não condicionante¹⁴⁴ e regulando a velocidade do ergómetro de ensaio para 1.7 m/s¹⁴⁵. Os valores estipulados ($V_{erg\acute{o}metro}$ e WBGT) e os obtidos por medição durante este tipo de ensaio (TCI, $VO_{2m\acute{a}x}$, RC) serão, no desenvolvimento ulterior, considerados ‘padrão’.

Introduz-se aqui uma nota para referir que a escolha do parâmetro metabólico a utilizar (TCI, $VO_{2m\acute{a}x}$ ou RC) depende da amplitude e variabilidade das respostas que se vierem a obter para cada um deles, na situação concreta de ensaio. Esses parâmetros serão monitorizados simultaneamente, pelo que os seus dados estarão disponíveis e acessíveis, com igual fiabilidade, não sendo esse um fator diferenciador. Escolher-se-á, portanto, aquele cuja escala melhor se adegue ao contexto da aplicação prática pretendida. Essa seleção será concretizada e objeto de referência no capítulo seguinte.

Nesta fase da descrição, poder-se-á escolher um deles – seja, por exemplo, a TCI – como parâmetro central. Para a exposição subsequente - onde se explica o modo de obtenção da velocidade de execução do ensaio – a TCI será, pois, o único valor utilizado, visto que o desenvolvimento é idêntico, qualquer que seja a escolha efetuada. Considerando que a opção referida facilita a ‘comunicação’, adota-se - aqui e nas descrições seguintes - essa simplificação, sem perda de generalidade¹⁴⁶.

Retomando o ensaio acima descrito - o qual se estabeleceu como padrão, associado à situação *normal* - veja-se o gráfico da figura 4.5 que traduz, qualitativamente, a realidade perspetivada.

Esse gráfico pretende esquematizar a forma de obter o valor de $TCI_{padr\tilde{a}o}$, em termos laboratoriais, tendo em consideração o seguinte:

- O $WBGT_{padr\tilde{a}o}$ representa um valor fixo para o índice, determinado com base no estabelecimento de condições de ambiente térmico, no interior da câmara climática, que correspondam a uma situação dita ‘normal’, isto é, que não condicione o desempenho dos indivíduos na realização das atividades físicas propostas, por exemplo, $WBGT_{padr\tilde{a}o} = 18^{\circ}C$ ¹⁴⁷;
- A duração do ensaio é definida por D, nas condições ambientais correspondentes ao $WBGT_{padr\tilde{a}o}$ estipulado;

¹⁴⁴ Correspondente a uma situação climática ‘normal’. Sobre este aspeto, em toda a descrição subsequente do presente capítulo, o valor de $WBGT_{padr\tilde{a}o}$ considerado é de 18°C, o qual é indicado na tabela 1 da norma ISO 7243: 1989, como valor em que não existe necessidade de paragem de trabalho, nas condições mais desfavoráveis dos fatores de entrada ($Ar_{sens\acute{i}vel}$, Aclimat, CM) .

¹⁴⁵ Segundo a tabela 1 da norma ISO 7243_1989E, andar a uma velocidade entre 5.5 Km/h e 7 Km/h, corresponde à classe CM = 3 (nível de taxa metabólica alto). O valor adotado, convertido em m/s, é intermédio entre os dois limites referidos.

¹⁴⁶ Note-se que, caso se verifique ser preferível a utilização de outro parâmetro, que não a TCI, apenas será necessário substituí-lo, mantendo-se válida a restante descrição deste ponto.

¹⁴⁷ Valor obtido na tabela 1, ISO 7243:1989 e também em conformidade com nota anterior.

- A velocidade do ergómetro é regulada para o valor de 1.7 m/s, constante, de acordo com o anteriormente enunciado;
- A $TCI_{padrão}$ é a temperatura corporal interna em torno da qual o indivíduo estabiliza, ao longo do ensaio.

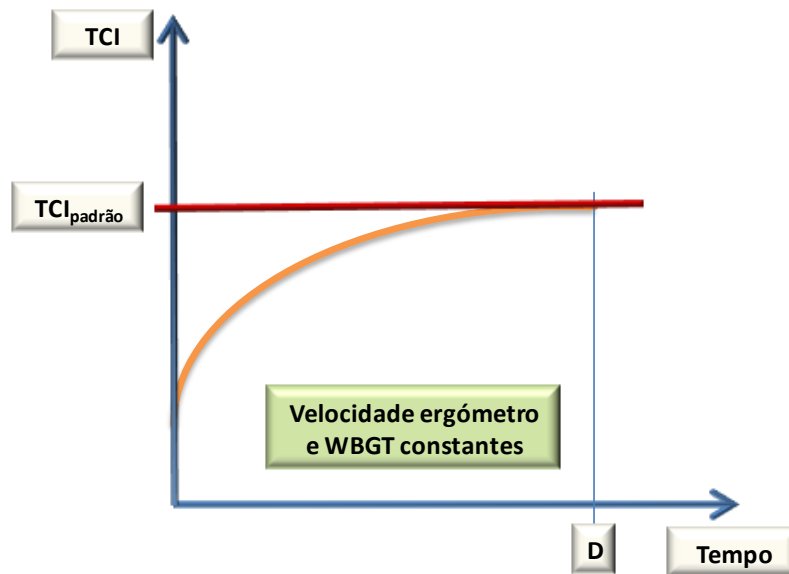


Figura 4.5 – TCI padrão

Obtida a $TCI_{padrão}$, esta é estabelecida como a TCI ‘alvo’ nos ensaios posteriores, procedendo-se do seguinte modo:

- Para a situação de ensaio, criar no interior da câmara climática um ambiente térmico quente e húmido, de características equivalentes às condições de trabalho nas frentes mineiras, com um índice WBGT inferior ao limite de referência¹⁴⁸;
- Nessas condições, iniciar o ensaio com o ergómetro à velocidade nominal (1.7 m/s) e monitorizar a TCI;
- Quando a TCI se aproxima do valor alvo ($TCI_{padrão}$, obtido no ensaio padrão), reduzir a velocidade do ergómetro de modo a que a TCI do indivíduo estabilize em torno de $TCI_{padrão}$;
- Quantificar a diminuição do ritmo de trabalho, com base no rácio entre a velocidade do ergómetro assim obtida e a velocidade padrão (1.7 m/s).

A redução de ritmo de trabalho, em termos percentuais, pode então ser calculada pela expressão:

$$DR (\%) = \left(1 - \frac{V_{ergómetro}}{V_{padrão}} \right) * 100\% \quad (\text{Eq. 4.14})$$

¹⁴⁸ Valor WBGT referência, de acordo com as condições de ventilação sensível, aclimação e classe metabólica associadas à realidade da atividade mineira.

Após ser conhecida a diminuição de ritmo em função da velocidade do ergómetro de ensaio (passo 1), nos termos indicados, efetua-se a sua conversão num TFT equivalente (passo 2), através da multiplicação da redução de atividade percentual pelo tempo de duração esperado para o ensaio (D), o que é traduzido pela equação 4.15:

$$TFT_{DR} = D \cdot DR \quad (min) \quad (Eq. 4.15)$$

Por último, a conversão do TFT_{DR} equivalente em unidades monetárias (passo 3) é obtida de forma análoga às anteriores, resultando:

$$C_{TFT_{DR}} = TFT_{DR} \cdot C_{TFTunit} \quad (u.m.) \quad (Eq. 4.16)$$

em que:

$C_{TFTunit}$ - Custo unitário TFT¹⁴⁹ (u.m.)

Finalmente, conhecidas as duas parcelas de custos associados à produtividade (paragem de trabalho e diminuição da ritmo), procede-se à sua adição, através da expressão:

$$C_P = C_{TFT_P} + C_{TFT_{DR}} \quad (u.m.) \quad (Eq. 4.17)$$

que nos permite determinar o custo global para a grandeza produtividade.

Introduz-se aqui uma observação para lembrar que a função objetivo (definida no ponto 4.2) é constituída pela adição dos três tipos de custos – C_e , C_s e C_p – que foram objeto de apresentações nos pontos precedentes (respetivamente, 4.3, 4.4 e 4.5), as quais culminaram no estabelecimento das equações 4.5, 4.7 e 4.17, que proporcionam as suas respetivas determinações analíticas e materializam o grupo B da figura 4.2.

Note-se, no entanto, que as expressões de cálculo de C_e , C_s e C_p (variáveis dependentes) foram realizadas com base em relações que integram um conjunto de variáveis independentes (ex.: intensidade de corrente, TCI, velocidade, entre outras), cujos valores não foram correlacionados, de forma substantiva, com outros fatores, nomeadamente, com as condições de ambiente térmico. Em concreto, estabeleceu-se a relação entre os custos e as variáveis independentes que os determinam, não sendo quantificada, em detalhe, a forma como essas variáveis independentes variam em função das características de ambiente térmico, elemento central no presente estudo.

Importa, pois, para finalizar o processo de modelização das relações funcionais entre variáveis (concretizando o grupo A da figura 4.2), estabelecer a correlação efetiva de cada uma das variáveis independentes consideradas com as condições de ambiente térmico ou,

¹⁴⁹ Utilizando os mesmos pressupostos anteriores.

mais especificamente, com os valores do índice WBGT que os caracterizam. Esse será o grupo de relações alvo da descrição apresentada nos pontos seguintes.

4.6 Relação I-WBGT

Em exposição anterior, foi focada a relação entre o consumo/custo de energia elétrica - associado à intensidade de corrente (I) que percorre o circuito de alimentação elétrica do sistema de condicionamento de ar (câmara climática) ou dos ventiladores secundários (minas) – e as características de ambiente térmico que resultam do estágio de funcionamento dos equipamentos, presumindo-se ser possível estabelecer uma função monótona entre os valores de I e do índice WBGT.

Sobre este aspeto e considerando as especificidades dos dois tipos de ‘unidades’ a monitorar, introduz-se aqui uma nota onde se salientam as principais diferenças a considerar, bem como os pressupostos a utilizar no estabelecimento da relação entre ‘consumo energético’ e o índice WBGT.

Repare-se que as condições de ambiente térmico no interior da câmara de ensaio são alteradas através da regulação do equipamento de climatização, não existindo ‘fontes’ de calor e humidade internas. Nesse sentido, o aumento de WBGT é conseguido pelo aumento do consumo de energia elétrica do equipamento que ‘cria’ e promove essa atmosfera, de modo a que se atinjam níveis de temperatura e humidade mais elevados. Veja-se que a relação a estabelecer, neste caso, parece ser contrária à que ocorre, em termos industriais, no interior de minas subterrâneas¹⁵⁰. Neste último caso, a situação é inversa, porquanto se pretende reduzir a temperatura e humidade através do sistema de ventilação, o que se repercute num aumento de consumo energético para se reduzir o valor do índice WBGT.

No entanto, ambas as situações poderão ser comparáveis, se considerarmos:

- As variações de custos e não os seus valores absolutos (aliás, na linha do que tem sido preconizado para outras variáveis);
- Os valores simétricos das variações de custos de consumo de energia, no contexto laboratorial.

Estes ‘artifícios matemáticos’ colocam a relação entre as duas variáveis (C_e , WBGT) no mesmo plano da que ocorre em aplicações reais típicas: a acréscimos de intensidade de corrente (I) correspondem decréscimos de WBGT.

A aceitação desta assunção tem como pressuposto que o consumo energético para produzir o aumento de WBGT do valor A para B, é idêntico ao necessário para o processo inverso, ou seja, para reduzir o índice WBGT de B para A. Na realidade, as eficiências de ‘aquecimento’ e ‘arrefecimento’ diferem, por razões técnicas e termodinâmicas, diferencial aqui negligenciado por se considerar que não influi no estabelecimento das funções

¹⁵⁰ Aí existe produção ‘interna’ de calor e humidade, pelo que o aumento do consumo de energia elétrica do sistema de ventilação está associado à diminuição dos valores de WBGT.

relacionais pretendidas. Em complemento a esta ideia e para esta fase de construção do modelo, podem ainda tecer-se os seguintes considerandos:

- Os ensaios a realizar na câmara climática devem simular as situações do contexto real, pelo que será indispensável incorporar, no modelo, comportamentos idênticos na relação entre variáveis, como é o caso I – WBGT;
- A utilização do valor simétrico das variações obtidas nos custos de energia, permite que a função objetivo estude e otimize o balanço entre os diversos custos intervenientes. De contrário, não existiria balanço a equacionar, visto que os três tipos de custos cresceriam, ou decresceriam, simultaneamente. Repare-se que o processo de otimização - cujas soluções e resultados corresponderão ao ponto ótimo de condições de operação - baseia-se numa ‘ponderação relativa’ de custos, o que será conseguido com a estratégia apontada;
- A magnitude de variação dos valores das funções que constituem o modelo não influencia, de modo direto, as suas possíveis aplicações futuras. Interessa, neste momento, criar um modelo que incorpore todas as ‘influências’, independentemente da escala de resposta que o mesmo venha a produzir. Esta será importante para testar a sensibilidade do modelo aos diversos *inputs*, numa fase de teste, posterior. Porém, para a sua aplicação num contexto real, as condições iniciais e funções relacionais terão de ser parametrizadas, caso a caso, face à realidade e circunstâncias do problema a ‘resolver’.

Em suma, a arquitetura do modelo não sofre alteração pelo fato de se utilizar o ‘artifício’ indicado. Face às considerações supramencionadas, o desenho proposto é, aliás, desejável, para que o modelo a estabelecer melhor capture a essência dos problemas reais que se pretendem simular.

A relação entre a variável I e o índice WBGT pode então ser representada por:

$$I = f(WBGT)$$

(Eq. 4.18)

Para a concretizar, será necessário recolher dados do impacte das condições de ‘climatização’ nos valores de WBGT, durante o funcionamento da câmara climática. O procedimento poderá ser o de incrementar os valores de WBGT, em patamares de 1°C e, para cada um deles, medir a intensidade de corrente necessária para o atingir, obtendo-se vários pontos de funcionamento (I, WBGT). Com os pontos encontrados, através de uma regressão, eventualmente linear, estabelece-se a função pretendida.

De notar que este procedimento assenta na recolha de dados reais, reveladores do ‘vínculo comportamental’ entre as duas variáveis, no interior da câmara climática, situação que será novamente abordada no capítulo 5 (seguinte), mediante a disponibilidade do tipo de dados indicado, nos termos supracitados.

Nesta fase do desenvolvimento da função, não existe informação quantitativa disponível que permita o estabelecimento da função I-WBGT. Para contornar e ultrapassar esse obstáculo, estipulam-se os intervalos de valores que as duas variáveis podem assumir, de forma simplificada, a saber:

- $[I_{\min}, I_{\max}]$ – o valor mínimo é zero (sistema desligado), sendo o máximo limitado pelo sistema de proteção elétrica instalado (digamos, 16 A);
- $[WBGT_{\min}, WBGT_{\max}]$ - os valores extremos a considerar correspondem às situações mais desfavoráveis expressas na norma ISO 7243: 1989, ou seja, um mínimo de 18°C (trabalhador não aclimatado, sem ventilação sensível, classe metabólica 4 e regime de trabalho contínuo) e máximo de 33°C (trabalhador aclimatado, em repouso);

considerando-se, ainda, como simplificações que:

- A relação entre I e $WBGT$ é linear;
- Aos valores de I_{\min} e I_{\max} correspondem, respetivamente, os valores de $WBGT_{\min}$ e $WBGT_{\max}$;

Com base nesta simplificação, obtém-se a função esquematizada no gráfico da figura 4.6.

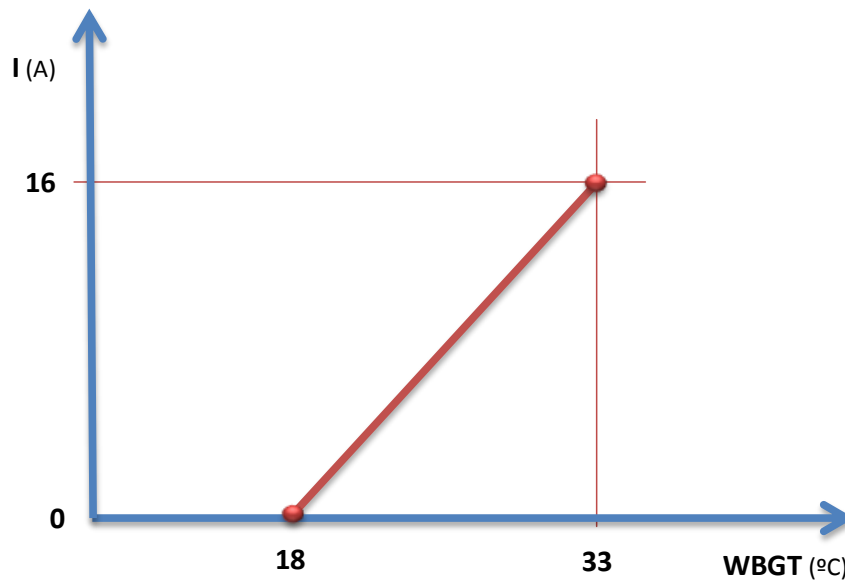


Figura 4.6 – Função I-WBGT inicial

cuja equação pode ser obtida pela expressão:

$$\frac{I - I_1}{I_2 - I_1} = \frac{WBGT - WBGT_1}{WBGT_2 - WBGT_1} \Leftrightarrow \frac{I - 0}{16 - 0} = \frac{WBGT - 18}{33 - 18} \Leftrightarrow$$

$$I = 1.067 WBGT - 19.2 \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Considerando que a expressão 4.19 reflete a relação entre o índice $WBGT$ e a intensidade de corrente (I) na situação real na câmara, o artifício proposto para a adaptar ao contexto mineiro, seguindo a mesma metodologia, resulta na expressão seguinte:

$$I = -1.067 WBGT + 35.2 \quad (\text{Eq. 4.20})$$

A equação assim determinada (Eq. 4.20) será incorporada no modelo inicial - nesta fase de ‘arranque’ - sendo substituída pela função que se vier a estabelecer, posteriormente, com base nos dados reais recolhidos nos ensaios (ver cap. 5).

Note-se que este procedimento de adaptação da função à realidade de funcionamento é recorrente sempre que se altera o contexto, nomeadamente, quando se pretender utilizá-la numa aplicação prática distinta da inicialmente considerada. Esta observação não só é válida para a função em causa, como para as restantes que integram e constituem o modelo final. Este é, aliás, um aspeto crucial na dinâmica de evolução e melhoria contínua do modelo, para lhe conferir adaptabilidade e, consequentemente, versatilidade de aplicação.

4.7 Relação TFT_s -WBGT

De acordo com a exposição realizada no ponto 4.4, o custo relacionado com a segurança é tendencialmente nulo, nos contextos de ensaios e medições reais a efetuar. Como então se referiu, o *tempo fora da tarefa* (TFT_s) depende do número de acidentes e incidentes ocorridos em função de cada ambiente térmico característico (WBGT), o que se considera negligenciável no âmbito do presente estudo, face à ínfima probabilidade de ocorrência desse tipo de situações, durante o seu desenvolvimento. Nesse sentido, será considerada a inexistência de acidentes, incidentes ou quase-acidentes ($N^\circ \text{ AIQA} = 0$) durante os ensaios ou na atividade mineira observada o que, pela equação 4.6, implica $TFT_s = 0$ e, consequentemente, $C_s = 0$ (eq. 4.7). Esta assunção, consistente com a realidade vigente, poderá ser suprimida, pela introdução de uma função que quantifique a relação entre o n° AIQA e o índice WBGT, na linha e de forma análoga ao indicado no ponto 4.6 (anterior), caso se obtenham dados para esse efeito.

Em suma, para a construção inicial do modelo - devido à inexistência de dados históricos (estatísticos) e da inviabilidade da sua obtenção nos estudos a empreender - adotam-se os valores mencionados, enquanto não surgirem novos dados ($TFT_s > 0$) que permitam incorporar estes efeitos.

4.8 Relação TFT_p -WBGT

Os *tempos fora da tarefa* relacionados com a quebra de produtividade (TFT_p) são originados pelo fator mais restritivo, de entre os dois que ‘obrigam’ à paragem de atividade, nomeadamente, a TCI máxima ou o WBGT limite de referência (ver descrição no ponto 4.5). Para avaliar o fator a considerar como ‘restrição ativa’, em cada momento, será inevitável computar os dois, separada e simultaneamente, para posteriormente se compararem. Tal facto conduz-nos, também, à necessidade de estabelecer as respetivas relações funcionais com as condições de ambiente térmico, para cada um deles, no âmbito do presente ponto. Esse desenvolvimento é descrito nos subpontos seguintes, separadamente.

4.8.1. Relação TFT_{tci} – WBGT

Para estabelecer uma relação inicial entre estas duas variáveis (TFT_{tci} , WBGT), ir-se-á utilizar uma metodologia semelhante à adotada para a determinação da função expressa na equação 4.20, isto é, na ausência de valores reais disponíveis¹⁵¹ para as variáveis, a função estabelece-se tendo em consideração uma relação linear entre elas, dentro do intervalo de amplitude máxima para as respetivas variações admissíveis. Reanalizando a figura 4.4, verifica-se que foram definidos dois critérios de paragem de atividade (C_1 e C_2):

- C_1 - O voluntário atinge o valor máximo estipulado para a temperatura corporal interna ($TCI = 39^\circ\text{C}$), ou;
- C_2 - O voluntário experimenta, durante o exercício, o surgimento de câibras térmicas.

Na primeira situação (C_1), iremos considerar que o intervalo da TCI do indivíduo varia entre as temperaturas 37°C ¹⁵² e 39°C , enquanto na segunda (C_2), a variação da TCI ocorrerá entre o mesmo limite inferior – 37°C - e um valor inferior a 39°C ¹⁵³. Os valores dos TFT_{tci} correspondentes a cada situação não dependem diretamente dos valores absolutos das TCI atingidas, mas sim da ‘velocidade’ com que são eventualmente alcançados, o que é refletido pelos tempos que decorrem até se atingirem essas situações limite (vide figura 4.4, eixo das abcissas, tempos T_1 e T_c). Neste pressuposto, interessa relacionar o tempo de ensaio (t_{ensaio}), que decorre até se atingir o critério de paragem (TCI ou câibra), com o WBGT a que o indivíduo está exposto, o que se traduz graficamente no diagrama da figura 4.7.

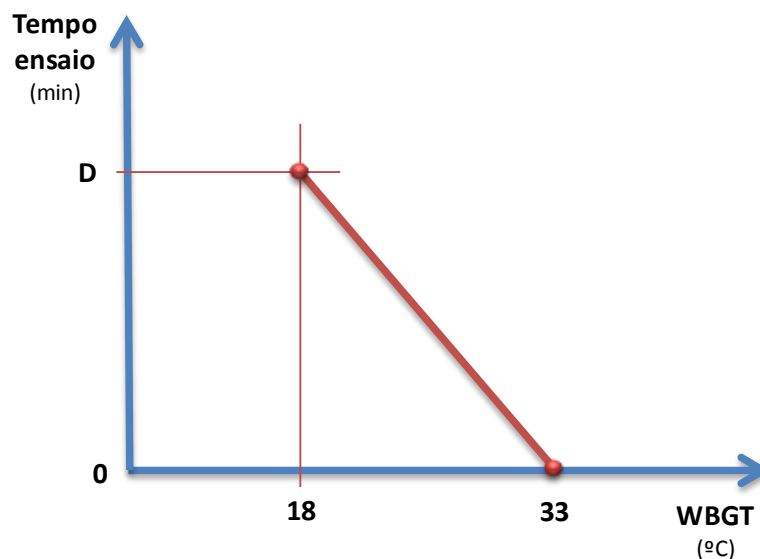


Figura 4.7 – Tempo de ensaio - WBGT

¹⁵¹ A obter, apenas, em levantamento de dados posterior.

¹⁵² Valor de temperatura corporal para um indivíduo saudável, em situação ‘normal’ de equilíbrio térmico.

¹⁵³ Caso se atinja $TCI = 39^\circ\text{C}$, encontramos-nos nas condições do critério anterior.

Assinale-se que o gráfico apresentado tem por base as seguintes aproximações, para os pares de valores extremos (WBGT, t_{ensaio}):

- (18, D) – A situação de ambiente térmico correspondente ao valor mínimo do intervalo de variação do índice WBGT (ou seja, 18°C)¹⁵⁴ é aqui associada ao cumprimento integral do tempo estipulado para os ensaios (D), sem que o voluntário atinja as condições limite de paragem (TCI ou câibra);
- (33, 0) – Para este ‘ponto de funcionamento’, em que WBGT é máximo e determinado para a condição de repouso, considera-se que o tempo de atividade do ensaio é, consequentemente, nulo.

Note-se que, mais uma vez, se trata de utilizar aproximações que permitam estabelecer uma relação quantitativa prévia, nesta fase, enquanto não se dispõe de dados recolhidos que permitam efetuar outra parametrização, mais consentânea com a realidade.

A tradução analítica da função esquematizada, por aplicação de uma expressão análoga à apresentada na eq. 4.19, resulta em:

$$\frac{t_{ensaio} - 0}{33 - WBGT} = \frac{D - 0}{33 - 18} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

ou:

$$t_{ensaio} = (-0,067 WBGT + 2,2).D \quad (\text{Eq. 4.22})$$

em que D é o tempo máximo estipulado para a atividade.

Aplicando a equação 4.9, que relaciona o *tempo de ensaio* (t) com o *tempo fora da tarefa* (TFT), vem:

$$TFT_{tci} = D - (-0,067 WBGT + 2,2).D \text{ (min)} \quad \text{ou} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$TFT_{tci} = (0,067 WBGT - 1,2).D \text{ (min)} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

A expressão assim obtida é válida para qualquer dos dois critérios de paragem considerados - C_1 (TCI) ou C_2 (câibra) - sendo computada para o menor valor de duração da atividade¹⁵⁵ que se venha a registar, caso a caso. Essa seleção pode, também, ser ponderada analiticamente por:

$$t_{ensaio} = \text{Min} [t_{ensaio}(C_1), t_{ensaio}(C_2)] \text{ (min)} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

¹⁵⁴ Recorde-se que este limite é o correspondente ao WBGT_{padrão} preconizado nos pontos 4.5.2 e 4.6, o qual foi então definido como não afetando o rendimento do indivíduo.

¹⁵⁵ Em concordância com a nota enunciada no ponto 4.5.1 sobre este assunto.

o que permite reconhecer qual o sintoma fisiológico que primeiro surge e que, portanto, é mais restritivo para a atividade física do indivíduo, mantidas as restantes condições e fatores inerentes à realidade em que o sujeito é monitorizado.

4.8.2. Relação $TFT_{WBG\text{T}}$ – WBGT

Como anteriormente se enunciou, a segunda causa de paragem de atividade é o índice WBGT, que caracteriza o ambiente térmico, atingir o valor de referência estipulado na norma ISO 7243 para as condições de ventilação, aclimação e nível de atividade metabólica (ver anexo 2.3) inerentes ao espaço-indivíduo-tarefa.

Para a caracterização da relação entre o *tempo fora da tarefa* (TFT_{wbgt}) e o ambiente térmico correspondente e, tendo em conta que se pretende aproximar os ensaios a realizar na câmara climática à realidade existente nas frentes de trabalho em contexto mineiro, consideram-se como valores iniciais para os fatores em causa, os seguintes:

- Ventilação sensível ($Ar_{sensível}$) - o sistema de ventilação secundário assegura o fornecimento de ar às frentes de trabalho ('fundo de saco') através de mangas que direcionam o caudal de ar para essas zonas. No entanto, sendo as tarefas executadas exatamente no *términus* do 'túnel' e sabendo-se que o avanço da manga fica 'aquém' da progressão da frente de trabalho, a circulação do ar nessa zona é normalmente difusa, não percecionada pelos trabalhadores. Nestas circunstâncias, dos dois estados possíveis (sim, não) para o fator 'deslocação sensível do ar' é estipulado que $Ar_{sensível}$ = 'Não', recriando-se esse tipo de condições na câmara climática;
- Aclimação (Aclimat) – a existência de trabalhadores aclimatados é uma realidade na atividade mineira subterrânea. Essa situação é normal, porquanto a execução de atividade regular em condições climáticas adversas impõe que os trabalhadores se encontrem adaptados ao ambiente, de modo a minimizar os riscos do exercício da respetiva atividade laboral para os correspondentes estados individuais de saúde. Essa condição será também considerada nos ensaios a realizar. Para o efeito, os voluntários serão sujeitos a um processo de aclimação térmica segundo protocolos de procedimentos definidos, pelo que, neste ponto, estabelece-se que os indivíduos realizam as atividades no estado de 'aclimatados' (Aclimat = 'Sim');
- Classe metabólica (CM) – as tarefas a realizar nas frentes de trabalho¹⁵⁶ podem considerar-se, neste âmbito, como correspondentes a uma taxa metabólica elevada (CM = 3), de acordo com a classificação de níveis de taxa metabólica proposta na tabela 1 da ISO 7243: 1989.

Da observação da tabela de valores de referência para o WBGT (anexo 2.3) e dos valores iniciais resultantes das considerações anteriores, resulta o 'contexto' já perspectivado no quadro 4.1 ($Ar_{sensível}$ = 'Não', Aclimat = 'Sim', CM = '3') e os correspondentes valores de referência WBGT para cada nível de atividade – de trabalho contínuo a 75% de tempo de

¹⁵⁶ Intenso trabalho de braços e tronco, conforme definido na tabela 1 da ISO 7243: 1989.

descanso – constantes no quadro 4.2, que aqui se recupera e adapta, resultando na informação sintetizada no quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Temperaturas de referência WBGT e TFT, para $Ar_{sensível} = \text{Não}$, $Aclimat = \text{Sim}$, $CM = 3$

Nível de atividade	TFT_{wbgt}	T_{ref}
Trabalho contínuo	0	25
75% Trabalho + 25% Descanso	0.25D	27
50% Trabalho + 50% Descanso	0.50D	29
25% Trabalho + 75% Descanso	0.75D	31

Os TFT_{wbgt} aí indicados foram calculados por aplicação da equação 4.10.

O gráfico da relação funcional entre TFT_{wbgt} e WBGT é apresentado na figura 4.8.

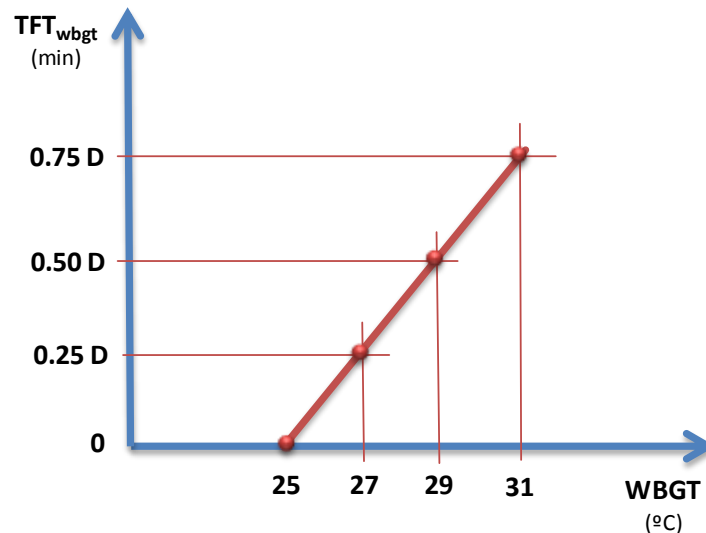


Figura 4.8 – Relação TFT_{wbgt} - WBGT

Analogamente ao realizado para as funções anteriores, a expressão analítica desta função inicial obtém-se por:

$$\frac{TFT_{wbgt} - 0}{WBGT - 25} = \frac{0.75D - 0}{31 - 25} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

ou seja:

$$TFT_{wbgt} = (0.125 WBGT - 3,125) \cdot D \quad (\text{Eq. 4.27})$$

Da conjugação dos dois fatores (TCI máxima e WBGT de referência) que delimitam a fronteira de condições admissíveis de trabalho, resulta o *tempo fora da tarefa* final a considerar (TFT_p), o qual será o de maior magnitude, de entre os obtidos pelas equações 4.24 e 4.27. Esta opção está de acordo com a descrição anterior (ver ponto 4.5.1) e em consonância com o definido pela equação 4.11.

4.9 Relação DR_p - WBGT

Para o estabelecimento desta relação, vamos socorrer-nos da variável instrumental de controlo, designada por ‘*velocidade do ergómetro de ensaio*’ ($V_{\text{ergómetro}}$), e dos limites (inferior e superior) do intervalo de variação admissível para o índice WBGT, em que:

- $V_{\text{ergómetro}} = 0$, para WBGT máximo de referência (33°C). Note-se que o valor de referência do índice mencionado corresponde à situação de repouso, o que é consistente com o estado de não movimento do ergómetro;
- $V_{\text{ergómetro}} = 1.7$ m/s, para WBGT = 18°C . Neste caso, associa-se a velocidade nominal do ergómetro ao valor do índice WBGT que caracteriza uma situação de ambiente térmico que não interfere no desempenho do sujeito¹⁵⁷.

Com os dois pontos assim determinados e utilizando uma metodologia idêntica à aplicada no desenvolvimento das funções anteriores, obtém-se o gráfico da figura 4.9:

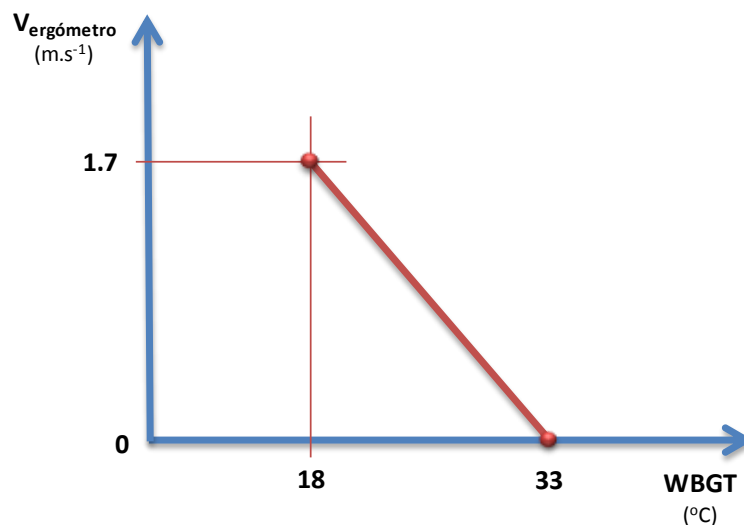


Figura 4.9 – Relação velocidade do ergómetro - WBGT

cuja tradução analítica se processa por aplicação da relação de ‘semelhança entre triângulos’, de forma análoga às anteriores, de que resultam as expressões seguidamente enunciadas:

¹⁵⁷ Ver ponto 4.5.2, onde estes valores de velocidade do ergómetro e de índice de stresse térmico foram designados como ‘padrão’.

$$\frac{V_{ergómetro}-0}{1.7-0} = \frac{33-WBGT}{33-18} \quad (\text{Eq. 4.28})$$

e:

$$V_{ergómetro} = -0.1133 WBGT + 3.74 \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Relembrando as equações 4.14 e 4.15, que relacionam a velocidade do ergómetro com a diminuição de ritmo de trabalho e esta com um *tempo fora da tarefa* equivalente, poderemos, finalmente, estabelecer a função pretendida, entre o TFT_{DR} e o índice WBGT, conjugando-as com a equação 4.29, donde:

$$TFT_{DR} = D \cdot \left(1 - \frac{(-0.1133 WBGT + 3.74)}{1.7}\right) * 100\% \quad (\text{Eq. 4.30})$$

resultando em:

$$TFT_{DR} = (0,067 WBGT - 1,2) \cdot D \quad (\text{Eq. 4.31})$$

Com a obtenção desta última relação, conclui-se o processo de definição e apresentação das funções relacionais, entre as diversas variáveis e as condições de ambiente térmico (WBGT).

4.10 Restrições de sinal

Para se terminar a descrição dos constituintes do modelo, de acordo com os passos esquematizados na figura 4.3, resta fazer referência às designadas *restrições de sinal*. Estes constrangimentos de *não negatividade* das variáveis são imprescindíveis para a definição dos seus domínios e contradomínios admissíveis, de forma a manterem o seu significado físico. Ou seja, não faz qualquer sentido, por exemplo, considerar a possibilidade de grandezas como ‘*quantidade produzida*’, ‘*custos*’ ou ‘*tempos de execução de atividade*’ assumirem valores negativos. Se de um ponto de vista estritamente matemático, a resolução do problema formulado pode existir para domínios/contradomínios em \mathbf{R} , a imposição de adesão à realidade impõe que ambos fiquem limitados ao espaço \mathbf{R}^+ .

Assim, pelas razões enumeradas, fica justificada a necessidade de inclusão de restrições que imponham a não negatividade das variáveis, o que se pode traduzir por:

$$\forall_{i=1}^n \text{ Variáveis}_i \geq 0 \quad (\text{Eq. 4.32})$$

finalizando-se a apresentação da sequência de quatro passos - ilustrada na figura 4.3 - para elaboração do modelo.

4.11 Modelo global síntese

Como súmula dos pontos antecedentes - onde se concretizaram individualmente os elementos e funções constituintes do modelo – será desejável agregar as relações finais estipuladas, o que irá culminar no desenho final do modelo pretendido, objeto de apresentação neste ponto.

É de notar que as funções relacionais estabelecidas foram desenvolvidas com recurso a alguns artifícios e simplificações, então explicitados(as), que permitiram quantificar os efeitos do ambiente térmico nas diversas grandezas, nesta fase, em que não existem ainda dados reais recolhidos. O conjunto de equações assim construído deve, portanto, ser considerado como ‘ponto de partida’ prévio, o qual será designado por ‘*Set 0*’ em toda a exposição posterior. Como também anteriormente se salientou, após o levantamento de dados (previsto no capítulo 5), as funções utilizadas no *Set 0* serão validadas, ou redefinidas, de modo a incrementar a aderência do modelo à realidade. Este último processo, de melhoria contínua, permitirá adaptar o modelo base às diversas realidades a modelizar. Nesse sentido, a constante dinâmica de validação ou atualização do modelo, estará diretamente relacionada com o surgimento e disponibilidade de informação quantitativa, atual, que reflita a realidade alvo de análise.

Portanto, sempre que nos encontremos na posse de dados que permitam ‘afinar’ as relações pré-estabelecidas, desencadear-se-ão os procedimentos¹⁵⁸ que conduzam ao estabelecimento de novas parametrizações entre as variáveis, mais assertivas. Esta ação conduz à modificação das expressões constituintes do modelo inicial (‘*Set 0*’), originando novos conjuntos de funções, distintos e mais recente, que serão designados por ‘*Set 1, 2, ..., n*’¹⁵⁹.

Após estas considerações, finaliza-se este capítulo com a apresentação de dois ‘*Set*’ alternativos, a saber:

- ***Set 0*** – conjunto inicial, cujas componentes foram objeto de desenvolvimento nos pontos precedentes. É o modelo base que concretiza a abordagem teórico-prática proposta para o tratamento da problemática em estudo. É a partir deste *Set* ‘raiz’ que se produzem as alterações subsequentes;
- ***Set 1*** – nesta fase, é possível estabelecer uma primeira alteração ao ‘*Set 0*’ que se consubstancia na substituição das expressões relativas ao cálculo da produtividade. Existem, publicados, modelos de produtividade *versus* ambiente térmico, oriundos de estudos quantitativos produzidos sobre a matéria¹⁶⁰. Estando esse tipo de instrumentos disponíveis, fará sentido utilizá-los como contraponto aos que se obtiveram pelo presente estudo (*Set 0*) e, também, como forma de integrar a informação relativa ao ‘*estado de arte*’, facultando uma maior abrangência aos conteúdos abordados.

¹⁵⁸ De forma análoga aos preconizados no estabelecimento do ‘*Set 0*’.

¹⁵⁹ A nomenclatura de classificação dos ‘*set*’ seguintes segue uma estrutura sequencial (*Set 2, Set 3, ...*).

¹⁶⁰ Ver ponto 2.2.4.

Por outro lado, caso as relações nelas contidas venham a ser validadas pelos dados recolhidos, a utilização desses modelos reveste-se de interesse:

- ✧ académico, devido à sua adequada estrutura e parametrização;
- ✧ prático, face à sua assertividade.

Se, ao invés, este novo modelo não for validado, então será abandonado, visto que as eventuais evoluções a produzir se centram no conjunto inicial, isto é, no *Set 0*.

A apresentação detalhada de ambos os '*Set*' será produzida a seguir, em pontos específicos.

Sobre estes dois modelos (*Set 0* e *Set 1*) devem referir-se, ainda, algumas notas complementares:

- Para a criação de ambos os modelos, se bem que por razões diferentes¹⁶¹, não é necessário o levantamento prévio de dados, pelo que se encontram reunidas as condições inerentes às suas utilizações, nesta fase;
- A informação quantitativa publicada cinge-se à problemática 'produtividade – ambiente térmico', sendo esta a única vertente que sofre alteração entre o *Set 0* e o *Set 1*. Não sendo conhecidos outros estudos que abordem as restantes componentes (segurança, energia, custos), a utilização do *Set 0* como modelo 'âncora' é essencial e inteiramente justificada.

Vejamos, então, a composição de cada modelo concreto, separadamente.

4.11.1. Modelo '*Set 0*'

A composição deste '*set*' baseia-se na reunião do conjunto de elementos e expressões definidos ao longo do texto anterior, do presente capítulo, contabilizando nas equações, desde logo, os valores das constantes utilizadas. A metodologia adotada para a sua apresentação é a de agrupar os seus componentes constituintes em grupos ou classes distintas, de acordo com as suas géneses ou finalidades, conforme se pode ver no quadro 4.4.

Quadro 4.4 – *Set 0*

Grupo/Classe	Elemento/Expressão	Observações
Variáveis	$C_e, C_s, C_p, WBGT_i, TFT_p, TFT_s, DR_p, I, Z, Pot, t$ ou $t_{ensaio}, E_e, TFT_{tci}, TFT_{wbgt}, TCI, t_{descanso}, P, VO_{2máx}, RC, TCI_{padrão}, V_{ergómetro}, TFT_{DR}, t_{ensaioC1}, t_{ensaioC2}, T_a, H_r$	(1)
Constantes	$U (230V),$ Custo unitário de energia (0.1418 u.m./kWh), Custo unitário TFT (1u.m.), AIQA (0), $TRecup_{Médio} (8h),$ Duração ensaio ($D = 2h$), $Ar_{sensível}$ (não), Aclimat (sim), CM (3), $TCI_{máxima} (39^{\circ}C), T_{ref}(wbgt), V_{padrão}(1.7m/s), WBGT_{padrão}(18^{\circ}C), [I_{min}, I_{máx}] = [0, 16A], [WBGT_{min}, WBGT_{máx}] = [18^{\circ}C, 33^{\circ}C]$	(2)

¹⁶¹ O primeiro, resulta da assunção de simplificações, enquanto o segundo, de informação publicada por outrem.

Quadro 4.4 – Set 0 (continuação)

Grupo/Classe	Elemento/Expressão	Observações
Função objetivo	$\text{Min } Z = \text{Min } [C_e + C_s + C_p]$	Eq. 4.2
Funções custo	$C_e = 0,032614 \cdot I$	Eq. 4.5
	$C_s = TFT_s \cdot C_{TFTunit}$	Eq. 4.7
	$C_p = C_{TFTp} + C_{TFTDR}$	Eq. 4.17
Relações instrumentais para determinação de custos	$TFT_s = N^{\circ} AIQA \cdot TRecup_{Médio}$	Eq. 4.6
	$TFT_{tci} = D - t$	Eq. 4.9
	$TFT_{wbgt} = D \cdot (\% T_{descanso})$	Eq. 4.10
	$TFT_p = \text{Máx} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$	Eq. 4.11
	$C_{TFTp} = TFT_p \cdot C_{TFTunit}$	Eq. 4.12
	$DR (\%) = \left(1 - \frac{v_{ergómetro}}{v_{padrão}}\right) \cdot 100\%$	Eq. 4.14
	$TFT_{DR} = D \cdot DR$	Eq. 4.15
	$C_{TFTDR} = TFT_{DR} \cdot C_{TFTunit}$	Eq. 4.16
	$I = -1.067 WBGT + 35.2$	Eq. 4.20
	$TFT_p = \text{Máx} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$	Eq. 4.11
Funções WBGT	$TFT_{DR} = 0.1333 WBGT - 2.4$	Eq. 4.31
	$t_{ensaio}(C_1 \text{ ou } C_2) = -0.133 WBGT + 4.4$	Eq. 4.22
	$t_{ensaio} = \text{Min} [t_{ensaio}(C_1), t_{ensaio}(C_2)]$	Eq. 4.25
	$TFT_{tci} = 0.133 WBGT - 2.4$	Eq. 4.24
	$TFT_{wbgt} = 0.25 WBGT - 6.25$	Eq. 4.27
	$V_{ergómetro} = -0.1133 WBGT + 3.74$	Eq. 4.29
	$\bigvee_{i=1}^n \text{Variáveis}_i \geq 0$	Eq. 4.32
Outras restrições	$I \leq 16$	
	$18 \leq WBGT \leq 33$	
	$TCI \leq 39$	
Produtividade	$P (\%) = \left(1 - \frac{TFT_p}{D}\right) \cdot 100\%$	Eq. 4.13

Observações:

- (1) - Conjunto de variáveis utilizadas pelo modelo. Foram integradas já as variáveis T_a (temperatura ar) e H_r (humidade relativa) que serão utilizadas no Set 1.

- (2) – Conjunto de constantes utilizadas e indicação dos seus respectivos valores, entre parêntesis, exceto para a constante $T_{ref}(wbgt)$. Para esta, existem quatro valores de referência, para cada situação (anexo 2.3).

De notar que a variável AIQA é, neste caso, considerada constante de valor = 0. Na ausência de dados, a variável $T_{RecupMédio}$ assume também um valor aleatório constante, positivo. Na realidade, caso AIQA seja diferente de zero, o valor de $T_{RecupMédio}$ será sempre positivo, o que está de acordo com o valor inicial arbitrado (8h).

Uma outra forma de apresentar o modelo - não muito distinta da indicada e aparte a prévia declaração de variáveis e constantes - será estruturá-lo de acordo com a formalização matemática clássica, utilizada na área de investigação operacional, para representação de um problema a otimizar, em concreto:



Figura 4.10 – Estrutura de formulação de um problema a otimizar

Por comparação com a enumeração adotada, trata-se apenas de reorganizar os conteúdos, separando a função objetivo (eq. 4.2) e as restrições de sinal (eq. 4.32) das demais, que constituem as designadas restrições funcionais. Por ser direta e intuitiva a passagem da primeira apresentação à segunda, considera-se não ser necessário aqui explicitá-la.

Adicionalmente, é de evidenciar que a estrutura de apresentação adotada permite isolar, no modelo global (*Set 0*), dois grupos de relações instrumentais com finalidades distintas, concretamente:

- Relações entre grandezas e WBGT – Funções que estimam a influência do ambiente térmico (WBGT) nos valores das variáveis a medir e, consequentemente, nos custos associados;
- Relações para determinação de custos – Obtidas através do estabelecimento de funções que permitam traduzir o impacto das variáveis - medidas no decurso dos ensaios/atividades (ex.: % $T_{descanso}$, t , $V_{ergómetro}$) - nos custos parcelares e total.

Estes dois grupos de relações dão origem a dois modelos independentes, derivados do global, com âmbitos de aplicação mais restritos, designados por:

- **Set 0_T** – De cariz teórico, baseado nas relações estimadas entre as grandezas e o WBGT;
- **Set 0_P** – De pendor mais aplicado, operando sobre os valores reais medidos.

Repare-se que, com a utilização do *Set 0_T*, poder-se-á simular o comportamento de resposta do modelo definido, numa perspetiva geral, através do ‘*varrimento*’ dos valores da

variável independente de entrada (WBGT), entre os seus correspondentes mínimos e máximos. Por sua vez, a aplicação do *Set 0_P* conduz ao cálculo dos valores de custo resultantes da contabilização dos valores reais que as variáveis de interesse assumem, em cada momento, numa focalização de índole mais particular, em que a necessidade da prévia realização de medições dos valores das variáveis é uma evidência.

No quadro 4.5 sintetizam-se as estruturas de cada um dos submodelos citados, articulando as equações com as variáveis e/ou funções em que incidem, tomando como referencial inicial o modelo global indicado no quadro 4.4 e a nomenclatura aí utilizada. Apresentam-se, unicamente, as referências das equações que integram os modelos, considerando que a restante informação (variáveis, constantes, restrições de sinal) se mantêm inalterada, sendo desnecessária a sua duplicação.

Quadro 4.5 – Equações dos *Set 0_T* e *Set 0_P*

<i>Set 0_T</i>	Valores	<i>Set 0_P</i>
Eq. 4.2	Z	Eq. 4.2
Eq. 4.5	C _e	Eq. 4.5
Eq. 4.7	C _s	Eq. 4.7
Eq. 4.17	C _p	Eq. 4.17
Eq. 4.20	I	Medir
Eq. 4.6	TFT _s	Eq. 4.6
Eq. 4.12	CTFT _p	Eq. 4.12
Eq. 4.16	CTFT _{DR}	Eq. 4.16
Eq. 4.22	t	Medir
Eq. 4.24	TFT _{ici}	Eq. 4.9
	% t _{descans}	Medir
Eq. 4.27	TFT _{wbgt}	Eq. 4.10
Eq. 4.11	TFT _p	Eq. 4.11
Eq. 4.29	V	Medir
Eq. 4.14	DR	Eq. 4.14
Eq. 4.31	TFT _{DR}	Eq. 4.15
Eq. 4.13	P	Eq. 4.13

No quadro 4.5, assinalam-se a verde os valores determinados com recurso às mesmas equações (tronco comum) e a amarelo os que se obtêm de modo distinto, para cada um dos *Set* alternativos.

Em resumo, as duas valências do *Set 0* possibilitam, por um lado, a determinação de um custo real, para um dado conjunto de valores medido para as variáveis de entrada¹⁶² (*Set 0_P*) e, por outro, simular o impacte expectável do WBGT nas variáveis instrumentais e nos custos¹⁶³ (*Set 0_T*). Da conjugação dos dois tipos de resultados, se aferirá a validade

¹⁶² Utilizando o grupo de relações instrumentais para determinação de custos.

¹⁶³ Utilizando o grupo de relações instrumentais entre grandezas e WBGT.

das equações previamente estabelecidas. Nos capítulos 5 e 6, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os dados disponíveis.

Concluída a exposição do modelo ‘Set 0’, segue-se a enumeração das alterações e novas funções que conduzem à obtenção do ‘Set 1’, com base neste.

4.11.2. Modelo ‘Set 1’

Para a definição do modelo que corresponde ao Set 1, procede-se, previamente, a uma análise sumária das características dos modelos de produtividade identificados na pesquisa bibliográfica (ver ponto 2.2.4) e respetivos âmbitos de aplicação. O objetivo será o de identificar e selecionar aquele que melhor se adegue às condições da aplicação a executar. Recorde-se que se pretende encontrar um ‘set’ alternativo ao definido (Set 0), em que se substituem as funções que relacionam a produtividade com o ambiente térmico, por outra(s), oriunda(s) dos estudos publicados sobre a matéria.

Da pesquisa efetuada, foram identificadas quatro propostas de modelos que relacionam a produtividade com o ambiente térmico, as quais seguidamente se apresentam e comentam. De referir que as três primeiras (Koehn e Brown, Thomas e Yiakoumis e Sherif Mohamed e Korb Srinavin) foram obtidas pelo ajuste de funções que se basearam na recolha de dados reais, no decurso de atividades realizadas em contextos ambientais quentes e húmidos, enquanto a última (Zhao, Zhu e Lu 2009) se baseia em dados recolhidos para o mesmo tipo de ambiente térmico, em ensaios laboratoriais controlados.

- **Modelos de Koehn e Brown (1) e de Thomas e Yiakoumis (2)**

Koehn e Brown (1985) desenvolveram duas funções – uma para ambientes frios (-29°C a 10°C) e outra para ambientes quentes (21°C e os 49°C) - que relacionam a produtividade com a temperatura do ar e a humidade relativa. De eventual interesse, neste caso, será a função ajustada para ambientes quentes, por ser aquele onde incide o presente estudo. A expressão que propõem para ambientes com essas características é:

$$P = 0,0517 T_a + 0,0173 H_r - 0,00032(T_a)^2 - 0,0000985 (H_r)^2 - 0,0000911 (T_a \cdot H_r) - 1,459 \quad (\text{Eq. 4.33})$$

em que:

T_a – Temperatura do ar, em °F;

H_r – Humidade relativa, em %;

P – Produtividade (%).

Também Thomas e Yiakoumis (1987) propõem um modelo similar, baseado no mesmo conjunto de variáveis, utilizando um ajuste diferente:

$$Pr = 9.448 + 0.0518 T_a - 2.89 \ln(T_a) + 3.89 \times 10^{-37} e^{(H_r)} \quad (\text{Eq. 4.34})$$

em que:

- T_a – Temperatura do ar às 13h, em °F;
 H_r – Humidade relativa às 13h, em %;
 Pr – Rácio de performance (verificado/previsto)

Os autores indicam, como intervalo de validade para os resultados, valores de temperatura do ar entre 11°C e 28°C e de humidade relativa compreendidos entre 19% e 85%. Afirmam que, a partir do valor de Pr , será possível determinar a produtividade do dia de trabalho.

- **Modelo de Sherif Mohamed e Korb Srinavin**

Ao contrário dos dois modelos anteriores, esta proposta assenta os seus resultados no parâmetro PMV (Mohamed e Srinavin 2002). Neste caso, os autores desenvolveram três funções que relacionam a produtividade com o PMV, em situações de tarefas leves, moderadas e pesadas, as quais designaram, respetivamente, por P_L , P_M e P_H .

Essas três funções - aplicáveis para uma amplitude térmica entre 5°C e 45°C, de acordo com os autores - são definidas, respetivamente, pelas expressões analíticas seguintes:

$$P_L = 102 - 0.80 \text{ PMV} - 1.84 (\text{PMV})^2 \quad (\text{Eq. 4.35})$$

$$P_M = 102 + 1.19 \text{ PMV} - 2.17 (\text{PMV})^2 \quad (\text{Eq. 4.36})$$

$$P_H = 83 + 21.64 \text{ PMV} - 9.53 (\text{PMV})^2 + 0.91 (\text{PMV})^3 \quad (\text{Eq. 4.37})$$

- **Modelo de Zhao, Zhu e Lu**

Este último modelo contabiliza o *tempo de tolerância ao calor* (H_{tt}) dos indivíduos, quando sujeitos a determinadas condições de ambiente térmico ($x = \text{WBGT}$), em três condições de trabalho físico: leve (L), médio (M) e pesado (H). As expressões propostas, neste caso, são, respetivamente:

$$H_{ttL} = 0.0869x^3 - 9.3769x^2 + 336.24x - 4004.5 \quad (\text{Eq. 4.38})$$

$$H_{ttM} = 0.1508x^3 - 16.601x^2 + 608.11x - 7411.8 \quad (\text{Eq. 4.39})$$

$$H_{ttH} = 0.0519x^3 - 5.6694x^2 + 206.04x - 2490.3 \quad (\text{Eq. 4.40})$$

O intervalo de valores do índice WBGT utilizado na estimação das equações está compreendido entre o mínimo de 34°C e o máximo de 38.5°C.

Segundo os autores, aos tempos de tolerância ao calor assim determinados correspondem os três níveis de produtividade calculados pelas expressões seguintes, respetivamente, para as condições de trabalho L, M e H:

$$P_L = -0,286 t^2 + 0,6256 t - 0,07 x + 2,94 \quad (t \leq H_{tt}) \quad (\text{Eq. 4.41})$$

$$P_M = -0,364 t^2 + 0,7476 t - 0,05301 x + 2,09 \quad (t \leq H_{tt}) \quad (\text{Eq. 4.42})$$

$$P_H = -0,5963 t^2 + 0,9115 t - 0,0676 x + 2,44 \quad (t \leq H_{tt}) \quad (\text{Eq. 4.43})$$

onde t é o tempo de trabalho (h), H_{tt} o tempo de tolerância ao calor (h), x o índice WBGT (°C) e P_L , P_M and P_H são as produtividades (%), respetivamente, para tarefas leves, medias e pesadas.

Apresentados os quatro modelos de produtividade-ambiente térmico disponíveis, referem-se alguns comentários, pela ordem inversa, acerca das suas adequações à situação a considerar no presente estudo, o que conduz aos critérios de seleção/exclusão adotados, a saber:

- O modelo proposto por Zhao, Zhu e Lu (2009), tem por base ensaios em que os valores de WBGT são sempre superiores ao limite máximo (33°C) estipulado para a realização das atividades, no contexto do presente estudo. Nesse sentido, este modelo foca-se numa realidade de ambiente térmico mais severo que o considerado, o que leva à sua não utilização no presente estudo;
- A proposta apresentada por Sherif Mohamed e Korb Srinavin baseia-se num índice de conforto térmico, *PMV*, o qual apresenta limitações na sua aplicação à conjuntura em causa. Genericamente, pode referir-se que esse índice não é aplicável em ambientes com velocidades de ar superiores a 1 m/s (ISO 7730: 2005) e em situações que propiciem condições favoráveis ao surgimento de stresse térmico, como é o caso. Assim, também a aplicação deste modelo ao contexto pretendido é excluída;
- Os dois modelos restantes utilizam variáveis (T_a e H_r) que serão monitorizadas, quer nos ensaios a realizar na câmara climática, quer no interior das minas, pelo que, desse ponto de vista, são ambos aplicáveis. No entanto, o modelo desenvolvido por Thomas e Yiakoumis é válido num intervalo mais limitado do que o pretendido ($t_a = 28^\circ\text{C}$ e $h_r = 85\%$, como valores máximos) e, segundo testes realizados por Lopes, Baptista e Diogo (2008), apresenta grande instabilidade na resposta a alterações de pequena dimensão nos valores de h_r , pelo que também é excluído.
- Resta o modelo apresentado por Koehn e Brown, sobre o qual não se identificaram fatores que claramente limitem a sua aplicação, no âmbito do presente trabalho. Este é, por comparação com os restantes, aquele que melhor se adapta à situação de estudo, sendo escolhida a função preconizada para aplicação a ambientes quentes (eq. 4.33).

Selecionada a função ‘produtividade-ambiente térmico’ a utilizar, segue-se-lhe a definição do modelo ‘Set 1’ que lhe corresponde. Como anteriormente se mencionou, este novo modelo surge da transformação do modelo ‘âncora’ (Set 0), através da substituição apenas das funções relacionadas com a determinação da produtividade.

Note-se que o modelo inicial engloba duas componentes no cálculo da produtividade: uma vertente associada à paragem de atividade e, outra, que contabiliza a diminuição de ritmo

de trabalho. A função de Koehn e Brown não explicita essas parcelas, pelo que se considera tratar-se de uma expressão que determina a produtividade numa perspetiva global, englobando todos os aspetos.

Retomando a composição do *Set 0* (ver quadro 4.4), obtém-se o novo modelo (*Set 1*), operando as seguintes modificações:

- Retirar as equações correspondentes ao cálculo dos *tempos fora da tarefa* (e correlacionadas), que se associam exclusivamente à produtividade (eq. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.14, 4.15, 4.16, 4.22, 4.24, 4.25, 4.27, 4.29, 4.31);
- Introdução da nova função produtividade-ambiente térmico (eq. 4.33);
- Retirar a expressão de cálculo de custos associados à produtividade (eq. 4.17) e introduzir a nova expressão de custo, que considera um valor de custo unitário idêntico ao utilizado para TFT e a variável independente P, obtida pela equação 4.33:

$$C_p = P \cdot C_{TFTunit} \text{ (u.m.)} \quad (\text{Eq. 4.44})$$

O novo modelo assim obtido – *Set 1* – é sintetizado no quadro 4.6.

Quadro 4.6 – *Set 1*

Grupo/Classe	Elemento/Expressão	Observações
Variáveis	$C_e, C_s, C_p, WBGT_i, TFT_p, TFT_s, DR_p, I, Z, Pot, t, E_e, TFT_{tci}, TFT_{wbgt}, TCI, t_{descansowbgt}, P, VO_{2m\acute{a}x}, RC, TCI_{padr\tilde{a}o}, V_{erg\acute{o}metro}, TFT_{DR}, t_{ensaioC1}, t_{ensaioC2}, T_{as}, H_r$	(1)
Constantes	U (230V), Custo unitário de energia (0.1418 u.m./kWh), Custo unitário TFT (1u.m.), AIQA (0), TRecupMédio (8h), Duração ensaio (2h), $Ar_{sensível}$ (não), Aclimat (sim), CM (3), $TCI_{m\acute{a}xima}$ (39°C), $T_{ref}(wbgt)$, $V_{padr\tilde{a}o}$ (1.7m/s), $WBGT_{padr\tilde{a}o}$ (18°C), $[I_{min}, I_{m\acute{a}x}] = [0, 16A]$, $[WBGT_{min}, WBGT_{m\acute{a}x}] = [18^\circ C, 33^\circ C]$	(2)
Função objetivo	$Min Z = Min [C_e + C_s + C_p]$	Eq. 4.2
Funções custo	$C_e = 0,032614 \cdot I$	Eq. 4.5
	$C_s = TFT_s \cdot C_{TFTunit}$	Eq. 4.7
	$C_p = P \cdot C_{TFTunit}$	Eq. 4.44
Relações instrumentais	$TFT_s = N^\circ AIQA * TRecup_{M\acute{e}dio}$	Eq. 4.6
Funções WBGT	$I = -1.067 WBGT + 35.2$	Eq. 4.20
Outras restrições	$I \leq 16$ $18 \leq WBGT \leq 33$ $TCI \leq 39$	

Quadro 4.6 – Set 1 (Continuação)

Grupo/Classe	Elemento/Expressão	Observações
Produtividade	$P = 0,0517T_a + 0,0173H_r - 0,00032(T_a)^2 - 0,0000985(H_r)^2 - 0,0000911(T_a \cdot H_r) - 1,459$	Eq. 4.33
Restrições de sinal	$\bigvee_{i=1}^n \text{Variáveis}_i \geq 0$	Eq. 4.32

Finalizada a descrição global das formulações relativas aos dois modelos (*Set 0* e *Set 1*) é de salientar que os testes comparativos, entre eles, serão objeto de execução, análise e apresentação em capítulos seguintes (5 e 6). Dos resultados que se vierem a obter, pela introdução dos dados que se recolherem nas aplicações experimentais e práticas a desenvolver, se concluirá pela manutenção das funções/modelos agora propostas(os) ou, pela sua alteração paramétrica, em resultado de novos ajustes que se venham a revelar adequados.

É de referir, também, que alguns aspetos práticos, de pormenor, não foram aqui evidenciados, sendo no entanto, fundamentais numa aplicação prática. Por exemplo, a temperatura do ar é medida e utilizada, genericamente, em grau ‘*celsius*’. Porém, na expressão de cálculo da produtividade - definida por Koehn e Brown e aplicada no *Set 1* - essa variável é computada em grau ‘*Fahrenheit*’, pelo que há que proceder à conversão de unidades através da expressão respetiva, nomeadamente: $^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1,8 + 32$. Este e outros aspetos semelhantes serão ponderados e enumerados aquando da apresentação do modelo computacional.

Como nota final a este capítulo, assinala-se que os modelos serão codificados para utilização dos *softwares Excel* e *Lingo*¹⁶⁴. O *Excel* será empregue para testar a estrutura e articulação das funções do modelo e para obter resultados que permitam a produção de gráficos, enquanto o *Lingo* será utilizado no processo de otimização e análise de sensibilidade paramétrica. Também sobre estes aspetos instrumentais se fará a respetiva descrição, numa fase posterior, quando se concretizarem as respetivas aplicações (cap. 5).

¹⁶⁴ Marcas registadas, respetivamente, da *Microsoft* e *LINDO Systems Inc.*

5. LEVANTAMENTO, RECOLHA E TRATAMENTO DE DADOS

No presente capítulo apresentam-se os procedimentos utilizados na obtenção e tratamento dos dados empregues nos testes e simulações dos modelos (*Set 0* e *Set 1*) elencados no capítulo precedente.

Com o objetivo de facilitar a leitura e perceção dos conteúdos deste capítulo, entendeu-se útil evidenciar, desde já, alguns aspetos prévios de contextualização, quanto ao tipo e abrangência dos dados recolhidos e utilizados no presente estudo.

Para esse propósito, iniciam-se estas notas, relembrando a utilidade dos diferentes grupos de dados no processo de desenvolvimento e validação do modelo, considerando as fases sequenciais seguintes:

- Fase 1: Após concretização do modelo, para cada variável de entrada, são utilizados os dados correspondentes aos respetivos domínios admissíveis. A ‘alimentação’ do modelo com os dados do intervalo compreendido entre os valores extremos (mínimos e máximos) válidos, permite obter a ‘resposta’ global do modelo (contradomínio) e, conseqüentemente, avaliar a consonância (ou não) do seu comportamento com a informação técnico-científica publicada sobre o tema;
- Fase 2: Para cada um dos parâmetros das funções que constituem o modelo, são gerados acréscimos e decréscimos, em torno dos seus valores centrais (iniciais), de modo a que se possa analisar o impacte produzido na solução final, ou seja, qual a ‘sensibilidade’ do modelo às variações paramétricas introduzidas.
- Fase 3: Recolha de dados, em ensaios experimentais a realizar com voluntários na câmara climática existente no Laboratório de Prevenção de Riscos Ocupacionais e Ambientais (PROA) da FEUP. A utilização deste conjunto de dados irá possibilitar a validação (ou alteração) da parametrização das relações funcionais entre variáveis;
- Fase 4: Recolha de dados em atividades executadas nas frentes de trabalho de minas subterrâneas, os quais serão utilizados para validação (ou alteração) de parâmetros, analogamente ao indicado para a fase 3.

Sobre estas fases é de referir que as duas primeiras (1 e 2) dão suporte à análise da estrutura e comportamento concetual do modelo, enquanto as duas últimas se focam na adequação das funções aos contextos laboratorial (fase 3) e real de trabalho (fase 4).

Note-se que o tratamento pleno do tema envolve a concretização das quatro fases enunciadas, na sequência indicada. Porém, como anteriormente se mencionou, por razões de acessibilidade aos espaços previstos para aquisição de dados e de limitações temporais para a execução do presente trabalho no âmbito do programa doutoral, está prevista a concretização das fases 1 e 2, remetendo-se para desenvolvimentos futuros as duas restantes.

Contudo, a posterior concretização de recolha de dados em ambientes laboratoriais e/ou reais, quando vier a ocorrer, pressupõe a adoção de procedimentos que garantam a sistematização e uniformidade dos métodos e processos de aquisição de dados utilizados, aspetos fundamentais para se acautelar a imprescindível qualidade e fiabilidade da

informação resultante, bem como para a criação de condições de comparabilidade com resultados obtidos noutros estudos, sobre o mesmo tema. Essa definição de procedimentos *standard* abrange todas as etapas processuais inerentes à recolha de dados, em áreas tão distintas como sejam, por exemplo, a seleção de voluntários e trabalhadores a observar (ex.: idade, sexo, hábitos alimentares, estado saúde), a colocação do equipamento de monitorização da temperatura corporal interna (ex.: momento e condições de ingestão do sensor de temperatura, fixação de sensores e recetor de sinal ao corpo), a instalação da unidade de medição de parâmetros de ambiente térmico (ex.: localização espacial, intervalos de tempo entre medições) ou o registo de dados (ex.: quantidade, periodicidade, tipo de suporte).

Para tal, foram desde já desenhados os protocolos a implementar, apresentando-se no anexo 5.1, a título ilustrativo, a estrutura de organização documental proposta e um exemplo para cada um dos tipos de suporte definidos (modelos documentais, procedimentos, instruções de trabalho e formulários).

Um outro aspeto a salientar, como última nota introdutória ao presente capítulo (válida também para o capítulo seguinte), é a forma de apresentação de dados e resultados: na descrição subsequente (presente capítulo) optou-se por referi-los organizados em tabelas, enquanto na discussão de resultados (cap. 6) se privilegiou a representação gráfica. Esta opção pretende evitar a duplicação de conteúdos e adequar a forma de exposição aos objetivos descritivos de cada capítulo, ou seja, em formato tabelar, quando se pretende apenas referir valores (dados recolhidos) e, em formato gráfico, quando se pretende estabelecer comparações e tendências (discussão de resultados), independentemente da informação base ser coincidente para ambos.

Tomando como enquadramento geral as considerações supra-citadas, segue-se a descrição individualizada dos dados e testes efetuados a cada uma das versões do modelo:

- *Set 0_T* - Modelo base;
- *Set 1* – Modelo base modificado, através da substituição das funções iniciais relativas à grandeza ‘produtividade’ pelo ‘modelo de produtividade’ proposto por Koehn e Brown;

iniciando-se pela definição de variáveis e constantes.

5.1 Variáveis e constantes

Para os dois modelos (*Set 0* e *Set 1*) que se construíram com base nas equações iniciais, referem-se as variáveis utilizadas e os valores atribuídos às constantes, na realização dos testes a que os mesmos foram submetidos.

Este grupo de informação constitui um ‘tronco comum’ a ambas as versões do modelo, encontrando-se sintetizada nos quadros seguintes, designadamente, no quadro 5.1, são identificadas as variáveis, respetivas unidades e intervalos de variação e no quadro 5.2, apresentados os valores e unidades relativos a cada uma das constantes.

Quadro 5.1 – Variáveis do modelo

Variáveis	Valor	Unidade	Observações
C_e	Calcular	u.m.	Custo de energia
C_s	Calcular	u.m.	Custo de segurança
C_p	Calcular	u.m.	Custo de produtividade
$WBGT_i$	18 - 33	°C	Índice stresse térmico
TFT_p	Calcular	min	Tempo fora da tarefa (produtividade)
TFT_s	Calcular	min	Tempo fora da tarefa (segurança)
DR_p	Calcular	%	Diminuição de ritmo (produtividade)
I	0 - 16	A	Intensidade de corrente
Z	Calcular	u.m.	Custo total
Pot	Calcular	kW	Potência elétrica
t ou t_{ensaio}	0 – 120	min	Tempo de ensaio
E_e	Calcular	kW.h	Energia elétrica
TFT_{tci}	Calcular	min	Tempo fora da tarefa devido TCI
TFT_{wbgt}	Calcular	min	Tempo fora da tarefa devido WBGT
TCI	37 - 39	°C	Temperatura corporal interna
$t_{descanso}$	Calcular	min	Tempo descanso
P	Calcular	%	Produtividade
$VO_{2máx}$	Medir	ml/kg/min ou l/min	Consumo máximo de oxigénio
RC	Medir	bpm	Ritmo cardíaco
$TCI_{padrão}$	Calcular	°C	Temperatura corporal interna padrão
$V_{ergómetro}$	0 – 1,7	m/s	Velocidade do ergómetro de ensaio
TFT_{DR}	Calcular	min	Tempo fora da tarefa devido DR
$t_{ensaioC1}$	0 – 120	min	Tempo de ensaio até $TCI_{padrão}$
$t_{ensaioC2}$	0 – 120	min	Tempo de ensaio até câibras
T_a	18 - 40	°C	Temperatura do ar (bolbo seco)
H_r	60 - 90	%	Humidade relativa

Os intervalos de variações admissíveis para as variáveis a medir estão de acordo com os valores anteriormente estipulados, aquando da definição das funções entre aquelas e o índice WBGT, que permitirão calcular as restantes (com indicação de valor ‘*calcular*’). As duas variáveis com indicação de valor ‘*medir*’ não são, nesta fase, integradas no modelo, conforme se mencionou no ponto 4.5.2, razão pela qual não lhes foram atribuídos valores.

Quadro 5.2 – Constantes do modelo

Constantes	Valor	Unidade	Observações
U	230	V	Diferença de potencial eléctrico na rede
$C_{unitário\ energia}$	0.1418	u.m./kWh	Custo unitário de energia eléctrica (tarifário)
$C_{unitário\ TFT}$	1,00	u.m	Custo unitário de tempo fora da tarefa.

Quadro 5.2 – Constantes do modelo (continuação)

Constantes	Valor	Unidade	Observações
AIQA	0		Número acidentes, incidentes e quase-acidentes. Considerado nulo
$t_{\text{RecupMédio}}$	480	min	Tempo médio de recuperação. Qualquer, maior que zero
D	120	min	Duração máxima dos ensaios
$Ar_{\text{sensível}}$	Não		Deslocação do ar não sensível ao indivíduo
Aclimat	Sim		Indivíduos aclimatados termicamente
CM	3		Classe metabólica da atividade associada
$TCI_{\text{máxima}}$	39	°C	Temperatura corporal interna máxima permitida
$T_{\text{ref}}(\text{wbgt})$	25, 27, 29, 31	°C	Nas condições de $Ar_{\text{sensível}}$, Aclimat e CM definidos, relativos às 4 situações de atividade (trabalho contínuo ou percentagens de descanso de 25, 50 e 75%)
$V_{\text{padrão}}$	1,7	m/s	Velocidade do ergómetro correspondente a CM=3
$WBGT_{\text{padrão}}$	18	°C	Valor de WBGT para determinação de $TCI_{\text{padrão}}$
I_{min}	0	A	Sistema desligado.
$I_{\text{máx}}$	16	A	Intensidade máxima, regulada pelo dispositivo de proteção da instalação
$WBGT_{\text{min}}$	18	°C	Valor do índice para o qual não há restrições ao trabalho, nas condições mais desfavoráveis
$WBGT_{\text{máx}}$	33	°C	Valor do índice para situação de impossibilidade de atividade (em repouso)

Os valores atribuídos às constantes refletem o contexto que se pretende avaliar ($Ar_{\text{sensível}}$, Aclimat, CM), os limites críticos convencionados para o ambiente e o ser humano ($WBGT_{\text{min}}$, $WBGT_{\text{máx}}$, $TCI_{\text{máxima}}$), os custos de fornecimento de energia (C_{eunit}) e, ainda, as restrições técnicas vigentes (U , I_{min} , $I_{\text{máx}}$).

Com base no conjunto de valores mencionado, realizaram-se testes aos modelos desenvolvidos, obtendo-se, para cada *Set*, as ‘respostas’ que abaixo se apresentam.

5.2 Dados e testes prévios - *Set 0_T*

O ‘*Set 0*’ foi desenvolvido no sentido de reunir as equações que permitam responder às duas *necessidades* anteriormente enunciadas¹⁶⁵ e que aqui se recapitulam, sinteticamente:

- Estabelecer um modelo quantitativo, que explicita o comportamento das variáveis de entrada e respetivos custos, em função dos parâmetros ambientais (WBGT) – *Set 0_T*;
- Determinar os valores de custo resultantes de cada conjunto de valores reais medidos para as variáveis de entrada, em ensaios laboratoriais e/ou na atividade mineira – *Set 0_P*;

¹⁶⁵ Ver ponto 4.11.1.

A evolução e validação do *Set 0*, no seu todo, será operada pela análise comparada dos resultados produzidos pelos *Set 0_T* e *Set 0_P*, numa fase posterior, conforme se salientou nas considerações prévias estabelecidas no início do presente capítulo.

Dentro deste ponto e nesta fase de desenvolvimento do modelo, será abordada a componente relativa ao comportamento do modelo que contempla as relações funcionais estimadas para as diversas grandezas e características de ambiente térmico. Trata-se de efetuar um teste prévio ao comportamento do modelo ‘teórico’ proposto, ou seja, ao *Set 0_T*. Para tal, utilizam-se as equações correspondentes a esse *Set*, referidas no quadro 4.5, as quais foram implementadas numa folha de cálculo *Excel*. A explicitação das fórmulas utilizadas no cálculo é apresentada no anexo 5.2.

A metodologia adotada no procedimento de teste consiste na simulação do cálculo dos custos finais para cada nível do índice WBGT, fazendo-o variar entre os seus valores mínimo e máximo, com um passo de 1°C, de acordo com a sequência de operações indicada no fluxograma da figura 5.1.

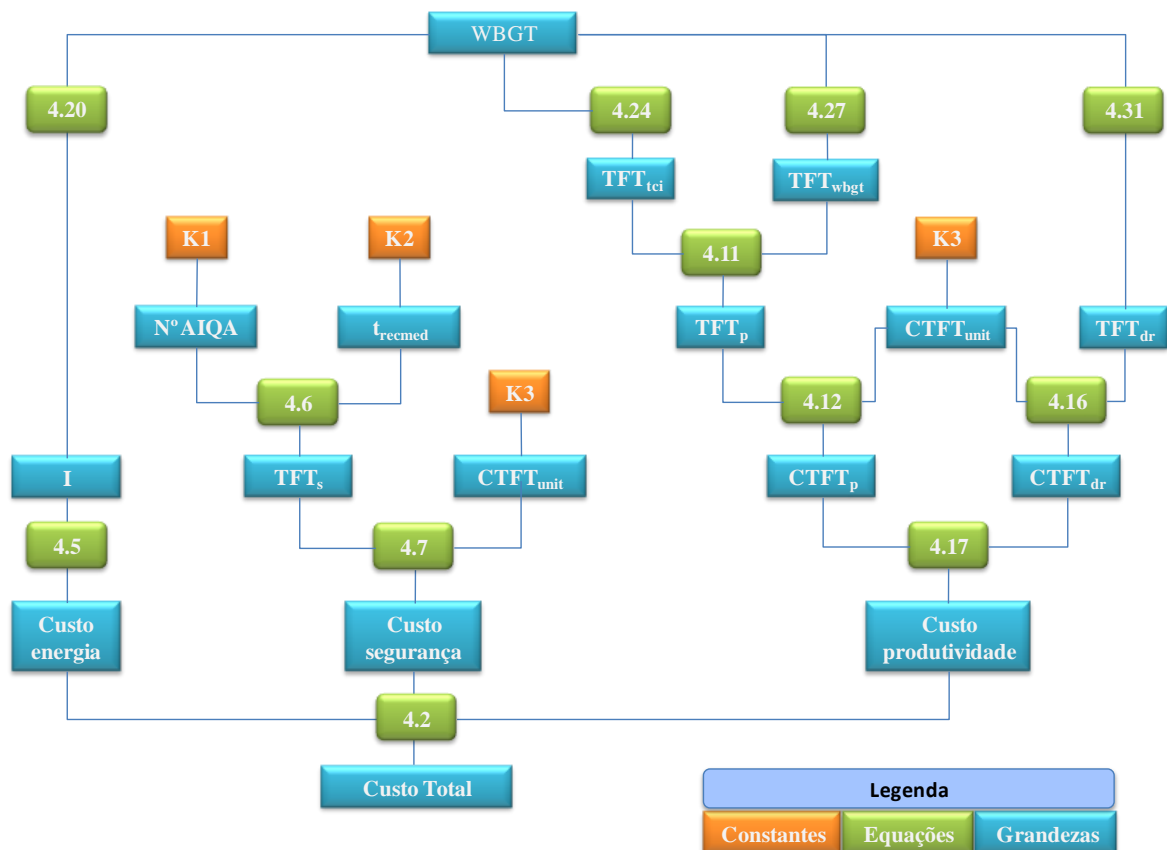


Figura 5.1 – Sequência de cálculo para *Set 0_T*

De notar que na figura 5.1 não são incluídas as equações relativas a t (4.22), V (4.29), DR (4.14) e P (4.13), que também integram o *Set 0_T* (ver quadros 4.4 ou 4.5). Tal facto deve-se a que, neste quadro, essas quatro grandezas não intervêm de forma direta no cálculo do custo total, razão pela qual não se encontram plasmadas no fluxograma apresentado. No

entanto, a determinação dos seus valores será certamente importante para a desejável comparação entre os resultados obtidos nos diferentes *Set* e cenários de estudo. Portanto, os valores de t , V , DR e P , considerados complementares para este *Set*, serão determinados também como função dos valores do índice WBGT, o que se encontra explicitado no diagrama do anexo 5.2.

Os valores da variável independente (WBGT) variam entre o mínimo de 18°C e o máximo de 33°C (ISO 7243:1989), os resultados globais obtidos nos testes efetuados (com a utilização da metodologia proposta) encontram-se sintetizados no quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Resultados globais para *Set 0_T*

WBGT (°C)	Custos (€)		
	Energia	Produtividade	Total
18	0,52	0,00	0,52
19	0,49	0,26	0,75
20	0,45	0,53	0,98
21	0,42	0,79	1,21
22	0,38	1,06	1,44
23	0,35	1,32	1,67
24	0,31	1,59	1,90
25	0,28	1,86	2,14
26	0,24	2,12	2,37
27	0,21	2,39	2,60
28	0,17	2,66	2,83
29	0,14	2,92	3,06
30	0,10	3,19	3,29
31	0,07	3,46	3,52
32	0,03	3,87	3,90
33	0,00	4,00	4,00

Os valores de cada uma das parcelas que conduziram aos resultados globais apresentados no quadro anterior são apresentados no anexo 5.3.

Ainda para o *Set 0_T* foram testadas outras variantes nas condições de entrada, cujos resultados permitem uma análise de sensibilidade (cap. 6), sumária, ao modelo. As alternativas consideradas consistem em:

- Variante A – Alteração do preço de energia (€/kWh), para valores superiores, modificando o ‘peso’ relativo das parcelas de custo;
- Variante B – Inversão do elemento preponderante na determinação do TFT_p . Na situação normal, considerada nos cálculos que conduziram aos resultados apresentados no quadro 5.3, o $TFT_p = \text{Máximo} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$. Nesta variante fictícia, considera-se $TFT_p = \text{Mínimo} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$, o que representa - face aos

valores de TFT_{tci} e TFT_{wbgt} determinados - em termos práticos, a inversão do fator que condiciona o TFT_p , mantendo-se, no entanto, a tendência de crescimento do tempo fora da tarefa com o incremento dos valores do índice WBGT, sendo esse o aspeto mais relevante a estipular, nesta fase.

Os resultados obtidos para cada uma das variantes são indicados nos quadros 5.4 a 5.6.

Quadro 5.4 – Resultados globais para *Set 0_T* – Variante A (custo energia 5x e 10x superior)

WBGT (°C)	Custos (€)				
	Energia 5 (5x)	Energia 10 (10x)	Produtividade	Total A5 (5x)	Total A10 (10x)
18	2,61	5,22	0,00	2,61	5,22
19	2,43	4,87	0,26	2,69	5,13
20	2,26	4,52	0,53	2,79	5,05
21	2,09	4,17	0,79	2,88	4,96
22	1,91	3,82	1,06	2,97	4,88
23	1,74	3,48	1,32	3,06	4,80
24	1,56	3,13	1,59	3,16	4,72
25	1,39	2,78	1,86	3,25	4,64
26	1,22	2,43	2,12	3,34	4,56
27	1,04	2,08	2,39	3,43	4,47
28	0,87	1,74	2,66	3,52	4,39
29	0,69	1,39	2,92	3,62	4,31
30	0,52	1,04	3,19	3,71	4,23
31	0,35	0,69	3,46	3,80	4,15
32	0,17	0,34	3,87	4,04	4,21
33	0,00	0,00	4,00	4,00	4,00

Quadro 5.5 – Resultados globais para *Set 0_T* – Variante B ($TFT_p = \text{Min} [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$)

WBGT (°C)	Custos (€)		
	Energia	Produtividade B	Total B
18	0,52	0,0	0,52
19	0,49	0,13	0,62
20	0,45	0,27	0,72
21	0,42	0,40	0,82
22	0,38	0,53	0,92
23	0,35	0,67	1,01

Quadro 5.5 – Resultados globais para *Set 0_T* – Variante B ($TFT_p = \min [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$) (continuação)

WBGT (°C)	Custos (€)		
	Energia	Produtividade B	Total B
24	0,31	0,80	1,11
25	0,28	0,93	1,21
26	0,24	1,32	1,56
27	0,21	1,70	1,91
28	0,17	2,08	2,26
29	0,14	2,47	2,60
30	0,10	2,85	2,95
31	0,07	3,23	3,30
32	0,03	3,72	3,76
33	0,00	3,99	3,99

Quadro 5.6 – Resultados globais para *Set 0_T* – Conjugação das Variantes A (custo energia 5x e 10x superior) e B ($TFT_p = \min [TFT_{tci}, TFT_{wbgt}]$)

WBGT (°C)	Custos (€)				
	Energia 5 (5x)	Energia 10 (10x)	Produtividade B	Total A5B	Total A10B
18	2,61	5,22	0,0	2,60	5,21
19	2,43	4,87	0,13	2,57	5,00
20	2,26	4,52	0,27	2,53	4,79
21	2,09	4,17	0,40	2,49	4,57
22	1,91	3,82	0,53	2,44	4,36
23	1,74	3,48	0,67	2,40	4,14
24	1,56	3,13	0,80	2,36	3,93
25	1,39	2,78	0,93	2,32	3,71
26	1,22	2,43	1,32	2,53	3,75
27	1,04	2,08	1,70	2,74	3,78
28	0,87	1,74	2,08	2,95	3,82
29	0,69	1,39	2,47	3,16	3,85
30	0,52	1,04	2,85	3,37	3,89
31	0,35	0,69	3,23	3,58	3,92
32	0,17	0,34	3,72	3,89	4,07
33	0,00	0,0	3,99	3,99	3,98

Os resultados relativos ao *Set 0_T*, indicados nos quadros 5.4 a 5.6, serão objeto de análise comparada e discussão no capítulo 6.

5.3 Dados e testes prévios - Set 1

Conforme enunciado no capítulo anterior, este *Set* alternativo é composto pelas variáveis e constantes comuns ao *Set 0_T* (já descritas em ponto precedente, neste capítulo) e pelas equações base referidas no quadro 4.6, cuja explicitação se pode observar na folha de cálculo *Excel* que constitui o anexo 5.4. Recorde-se que, na essência, este modelo difere do anterior pela forma de determinação dos custos associados à perda de produtividade, que aqui são calculados com recurso à utilização do modelo de produtividade proposto por Koehn e Brown (1985).

Analogamente ao realizado para o *Set 0_T*, também para este modelo se apresenta um fluxograma representativo da sequência de cálculo a adotar para a determinação dos custos globais pretendidos (figura 5.2).

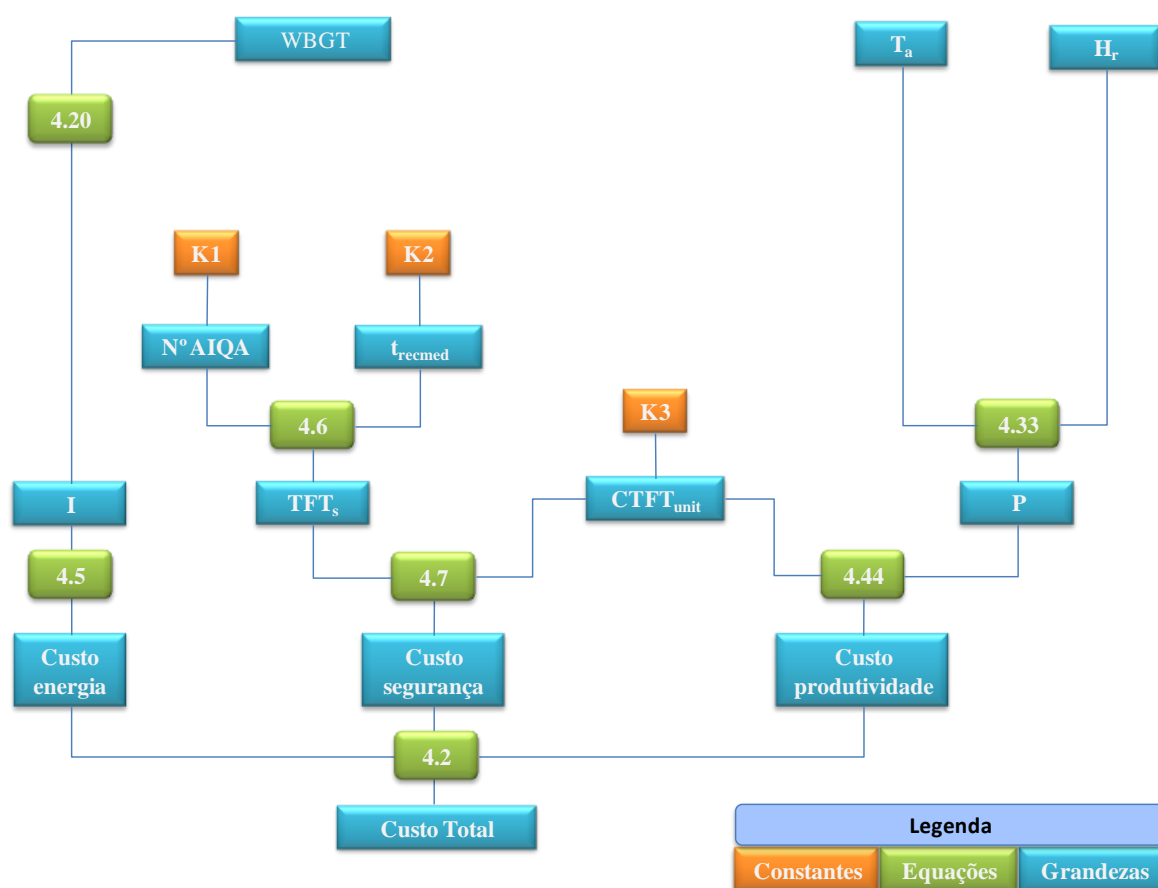


Figura 5.2 – Sequência de cálculo para *Set 1*

Como se pode ver na figura 5.2, o valor do índice WBGT é usado como dado de entrada apenas para a determinação dos custos de energia elétrica, enquanto que para a quantificação dos custos de produtividade, através do modelo de Koehn e Brown, se utilizam outros dois parâmetros ambientais: a temperatura do ar (T_a) e a humidade relativa (H_r).

Esta circunstância não constitui obstáculo à aplicação prática, porquanto está prevista a recolha simultânea de todos os parâmetros e índice em causa, no decurso dos ensaios a realizar na câmara climática e/ou medições a efetuar no interior da mina.

No entanto, nesta fase em que não estão disponíveis dados reais, colocam-se algumas limitações adicionais à execução dos testes prévios a efetuar ao comportamento do modelo, a saber:

- Para além dos limites de variação dos valores de WBGT¹⁶⁶, a temperatura do ar deverá estar compreendida entre 70°F ($\approx 21^\circ\text{C}$) e 120°F ($\approx 49^\circ\text{C}$), intervalo considerado como domínio da função pelos seus autores¹⁶⁷;
- Não existe possibilidade de estabelecer uma relação unívoca entre os valores de WBGT, T_a e H_r .

Estes constrangimentos condicionam o teste ao modelo global que constitui o *Set 1* (figura 5.2), em especial no que respeita à contabilização económica das variáveis. Veja-se que os custos de energia são função de WBGT, enquanto os custos relativos à perda de produtividade dependem de T_a e H_r .

A dificuldade surge devido ao facto de a um valor de temperatura do ar (T_a) constante poderem corresponder diferentes valores de WBGT¹⁶⁸ - em função do grau de humidade ou da temperatura radiante existentes no espaço - e de ser necessário contabilizar as parcelas (custos de energia e de produtividade) para a determinação do custo total, nas mesmas condições de ambiente térmico.

Sobre este aspeto e para os propósitos que se pretendem alcançar nesta fase de teste ao modelo, utiliza-se a seguinte simplificação, como meio de contornar a dificuldade enunciada: não sendo conhecidas as correspondências reais¹⁶⁹, entre os valores de T_a e WBGT, adota-se uma escala coincidente para as duas variáveis (T_a e WBGT).

Note-se que os resultados obtidos por inclusão deste artifício são fictícios, mantendo-se, no entanto, a tendência geral da função custo final, de acordo com o 'peso' relativo de cada parcela, o que nos permite testar o modelo, de modo similar ao efetuado para o *Set 0_T* (anterior).

A adoção desta estratégia de convergência de escalas (esquematizada na figura 5.3) – para a realização dos testes que conduziram aos resultados que seguidamente se apresentam - contorna o problema identificado e não coloca em causa a validade da análise ao comportamento de resposta do modelo, a qual se assume como objetivo primordial desta etapa.

Ainda sobre este assunto, uma referência ao intervalo de temperaturas usado para o cálculo dos custos parcelares e globais, o qual foi definido como a interseção dos intervalos que constituem os domínios das variáveis WBGT e T_a , conforme se pode ver na figura 5.3.

¹⁶⁶ Idênticos aos considerados para o *Set 0_T*, entre 18°C e 33°C .

¹⁶⁷ Koehn e Brown (1985).

¹⁶⁸ Por exemplo, para T_a constante, o valor de WBGT determinado para o ambiente será tanto maior, quanto mais elevada for a humidade relativa, o que evidencia a impossibilidade de estabelecimento de uma relação unívoca entre as escalas de temperatura T_a e do índice WBGT, conforme referido.

¹⁶⁹ As quais variam, caso a caso.

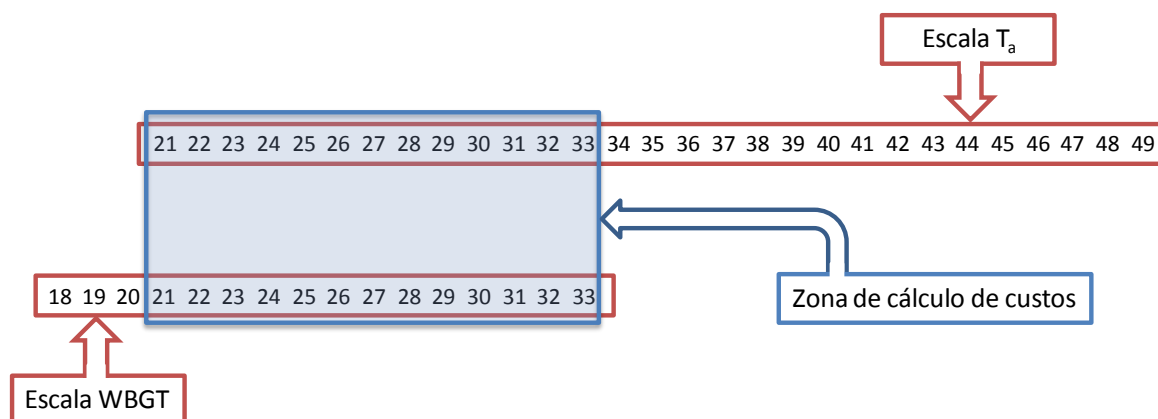


Figura 5.3 – Set 1 - Intervalos de temperaturas (WBGT, T_a e zona de cálculo de custos)

Retomando as limitações inicialmente formuladas, após as considerações anteriores quanto aos constrangimentos impostos na determinação do custo total, importa referir um outro aspeto, que se considera relevante.

Trata-se da análise preliminar ao comportamento do modelo de produtividade que integra este Set - proposto por Koehn e Brown - em função da variabilidade dos valores das suas variáveis de entrada (T_a , H_r), dentro do domínio estabelecido para a função.

Entende-se desejável avaliar esta componente, prévia e separadamente, visto que:

- Foi obtida e ‘desenhada’ externamente, não se conhecendo a sua resposta;
- Constitui a parcela inovadora, por comparação com o Set 0_T já testado;
- É uma componente determinante para o funcionamento do Set 1.

Neste contexto, a apreciação do Set 1 é realizada em duas etapas: a primeira, em que se centra a atenção apenas no desempenho do modelo proposto por Koehn e Brown (cálculo de produtividades) e, numa segunda, se obtêm resultados para o modelo global (cálculo de custos).

O procedimento adotado, na primeira fase, é o de fazer variar T_a entre o mínimo (21°C) e o máximo (49°C) admissível, com passo de 1 grau. Para cada temperatura (T_a) calcula-se a produtividade associada a graus de humidade relativa (H_r) entre 55% e 95%, com passo de 10%¹⁷⁰.

Na fase seguinte, determinam-se e adicionam-se os custos parcelares e analisa-se a resposta do modelo global, tendo em atenção as limitações e estratégia anteriormente explanadas.

Os resultados obtidos para cada uma das situações referidas são apresentados nos quadros seguintes (5.7 a 5.9).

No quadro 5.7 são mostrados os valores de produtividade, em função dos valores de temperatura do ar e humidade relativa, determinados pela aplicação do modelo de Koehn e Brown, isoladamente.

¹⁷⁰ Valores limite e passo idênticos aos utilizados pelos autores Koehn e Brown no seu estudo.

Quadro 5.7 – Resultados obtidos para o modelo de Koehn e Brown, para diferentes valores de T_a e H_r

T_a		Produtividade				
°C	°F	H_r (%)				
		55	65	75	85	95
21	70	0,894	0,886	0,857	0,809	0,741
22	72	0,897	0,887	0,856	0,807	0,737
23	73	0,898	0,885	0,854	0,802	0,731
24	75	0,896	0,882	0,849	0,796	0,723
25	77	0,892	0,877	0,842	0,787	0,713
26	79	0,887	0,870	0,833	0,777	0,701
27	81	0,879	0,860	0,822	0,764	0,686
28	82	0,869	0,849	0,809	0,749	0,670
29	84	0,857	0,835	0,794	0,732	0,651
30	86	0,843	0,820	0,776	0,713	0,631
31	88	0,827	0,802	0,757	0,692	0,608
32	90	0,809	0,782	0,736	0,669	0,583
33	91	0,789	0,760	0,712	0,644	0,557
34	93	0,766	0,736	0,686	0,617	0,528
35	95	0,742	0,710	0,659	0,588	0,497
36	97	0,716	0,682	0,629	0,556	0,464
37	99	0,687	0,652	0,597	0,523	0,429
38	100	0,657	0,620	0,563	0,487	0,392
39	102	0,624	0,586	0,528	0,450	0,352
40	104	0,589	0,549	0,490	0,410	0,311
41	106	0,552	0,511	0,449	0,368	0,268
42	108	0,513	0,470	0,407	0,325	0,222
43	109	0,472	0,428	0,363	0,279	0,175
44	111	0,429	0,383	0,317	0,231	0,125
45	113	0,384	0,336	0,268	0,181	0,074
46	115	0,337	0,287	0,218	0,129	0,020
47	117	0,288	0,237	0,165	0,075	-0,036
48	118	0,237	0,184	0,111	0,018	-0,094
49	120	0,183	0,129	0,054	-0,040	-0,154

A produtividade é representada como uma percentagem da eficiência normal das operações/tarefas, através da normalização dos valores obtidos pelos seus correspondentes valores máximos (Koehn e Brown, 1985).

Quanto aos resultados que relacionam os custos de produtividade e de energia elétrica, obtidos pela utilização do modelo global (*Set 1*), os mesmos são expostos nos quadros 5.8 e 5.9. As expressões e sequência de cálculo usadas (*Excel*) são apresentadas no anexo 5.4.

Quadro 5.8 – Custos de energia e quebra de produtividade obtidos para o Set 1

WBGT, T _a	Custos					
	Energia	Produtividade				
		Hr (%)				
		55	65	75	85	95
21	0,417	0,106	0,114	0,143	0,191	0,259
22	0,382	0,103	0,113	0,144	0,193	0,263
23	0,348	0,102	0,115	0,146	0,198	0,269
24	0,313	0,104	0,118	0,151	0,204	0,277
25	0,278	0,108	0,123	0,158	0,213	0,287
26	0,243	0,113	0,130	0,167	0,223	0,299
27	0,208	0,121	0,140	0,178	0,236	0,314
28	0,174	0,131	0,151	0,191	0,251	0,330
29	0,139	0,143	0,165	0,206	0,268	0,349
30	0,104	0,157	0,180	0,224	0,287	0,369
31	0,069	0,173	0,198	0,243	0,308	0,392
32	0,034	0,191	0,218	0,264	0,331	0,417
33	0,000	0,211	0,240	0,288	0,356	0,443

Quadro 5.9 – Custos totais obtidos para o Set 1

WBGT, T _a	Custos globais				
	Hr (%)				
	55	65	75	85	95
21	0,523	0,532	0,560	0,608	0,676
22	0,485	0,496	0,526	0,576	0,645
23	0,450	0,462	0,494	0,545	0,617
24	0,417	0,431	0,464	0,517	0,590
25	0,386	0,401	0,436	0,491	0,565
26	0,357	0,374	0,410	0,467	0,543
27	0,330	0,348	0,387	0,445	0,522
28	0,305	0,325	0,365	0,425	0,504
29	0,282	0,304	0,345	0,407	0,488
30	0,261	0,284	0,328	0,391	0,473
31	0,242	0,267	0,312	0,377	0,461
32	0,226	0,252	0,299	0,365	0,451
33	0,211	0,239	0,288	0,355	0,443

Uma nota para referir que os custos relativos ao fator ‘*quebra de produtividade*’ foram calculados pelo produto entre os valores de custo unitário (como usualmente) e da diferença entre a produtividade máxima (100%) e a produtividade determinada pelo

modelo de Koehn e Brown¹⁷¹, visto que esses custos se associam à diminuição da grandeza e não ao seu valor absoluto.

Recorda-se, ainda, que os valores de custo global obtidos apenas podem ser analisados numa perspetiva de ‘tendência’, por se tratar de valores ‘enviesados’, devido à utilização de uma escala coincidente para a temperatura do ar e índice WBGT, o que consubstancia uma realidade virtual, fictícia.

Os resultados aqui mostrados, que refletem a concretização das fases 1 e 2 enunciadas nas considerações iniciais ao presente capítulo, serão objeto de análise e discussão no capítulo 6, tendo em atenção os pressupostos e observações anteriores.

5.4 Solução e análise de sensibilidade global (*Software Lingo*) - Set 0_T

Em ponto anterior (5.2), foram apresentados resultados relativos a alterações nas condições iniciais, nomeadamente quanto aos valores de custo de energia (variante A) e de inversão na preponderância dos fatores determinantes para o cálculo de TFT_p (variante B). Essas duas variantes configuram, em si mesmas, uma análise de sensibilidade prévia ao comportamento do modelo, possibilitando constatar como a alteração de ‘peso’ daqueles fatores influenciam a solução final obtida, aspetos que serão objeto de discussão no capítulo seguinte. Note-se que as alterações anteriores foram produzidas com utilização de valores pontuais, numa escala discreta, visando mostrar a forma como alterações de elevada probabilidade de ocorrência, numa perspetiva prática (ex.: alteração de preços de energia, no mercado), seriam ‘acomodadas’ pelo modelo.

No entanto, uma análise de sensibilidade global e de nível mais ‘profundo’, em que se considerem as possíveis variações dos valores de interesse, numa escala mais fina, pode ser executada com recurso a ferramentas informáticas para resolução e otimização de problemas de programação (linear ou não linear), da área de investigação operacional.

Para esse propósito selecionou-se o *software Lingo*, na sua versão de demonstração ‘*Demo Lingo/Win32 13.0.2.20*’, em regime de acesso livre¹⁷², o qual será utilizado no tratamento do problema (e suas variantes) e como complemento à análise de sensibilidade pontual e preliminar, executada no ponto 5.2.

Seguindo uma estratégia de apresentação semelhante à adotada nos pontos antecedentes, serão aqui referidos os resultados obtidos pelo programa, remetendo-se para o capítulo seguinte a discussão dos mesmos.

Comece-se pela visualização da figura 5.4, que reproduz a parcela do programa relativa à introdução das expressões do Set 0 no programa *Lingo*.

¹⁷¹ Que integra o Set 1, em análise.

¹⁷² Disponível em <http://www.lindo.com>, acedido a 8 de Abril de 2013.

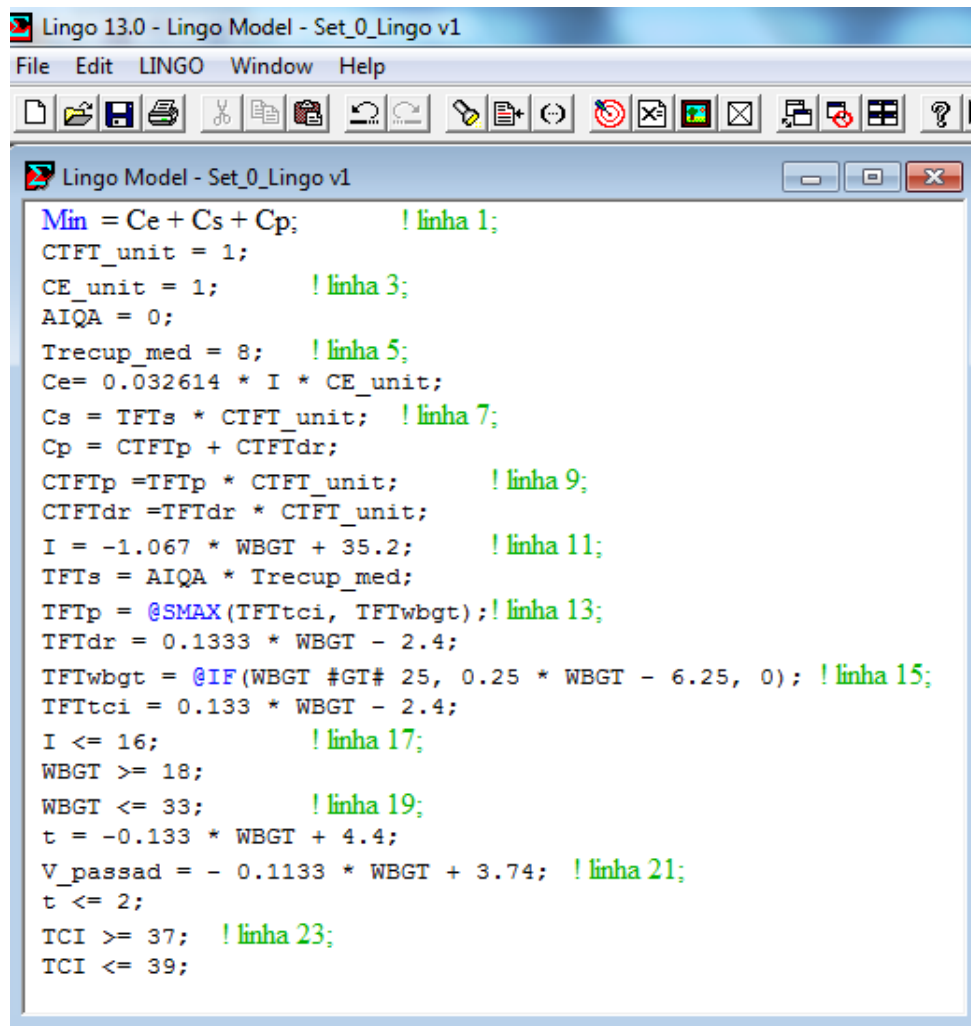


Figura 5.4 – Expressões do Set 0_T introduzidas no *software Lingo*

A execução do programa produz resultados (ver figura 5.6, a seguir) que se reportam às linhas de cada equação ou inequação, de acordo com a sequência adotada na formalização inicial (figura 5.4).

Nesse sentido, para facilitar a posterior identificação das linhas em causa, indicam-se como comentários (iniciados por ‘!’ e que o programa codifica com a cor ‘verde’, não os considerando no processo de cálculo) as linhas ímpares (1, 3, ..., 23) a seguir a cada uma das expressões que lhes correspondem.

Ainda sobre a visualização da informação constante na figura 5.4, uma outra referência para o modo como o *software* explicita as funções que integram a sua ‘biblioteca’ interna: representa-as pela cor ‘azul’, como se pode constatar na representação de ‘Min’ ou ‘@SMAX’.

Para o exemplo indicado na figura 5.4 obtêm-se os *outputs* indicados nas figuras seguintes (5.5 a 5.7), correspondentes aos dados gerais do processo de otimização (fig. 5.5), aos valores da solução obtida (fig. 5.6) e aos dados relativos à análise de sensibilidade (fig. 5.7).

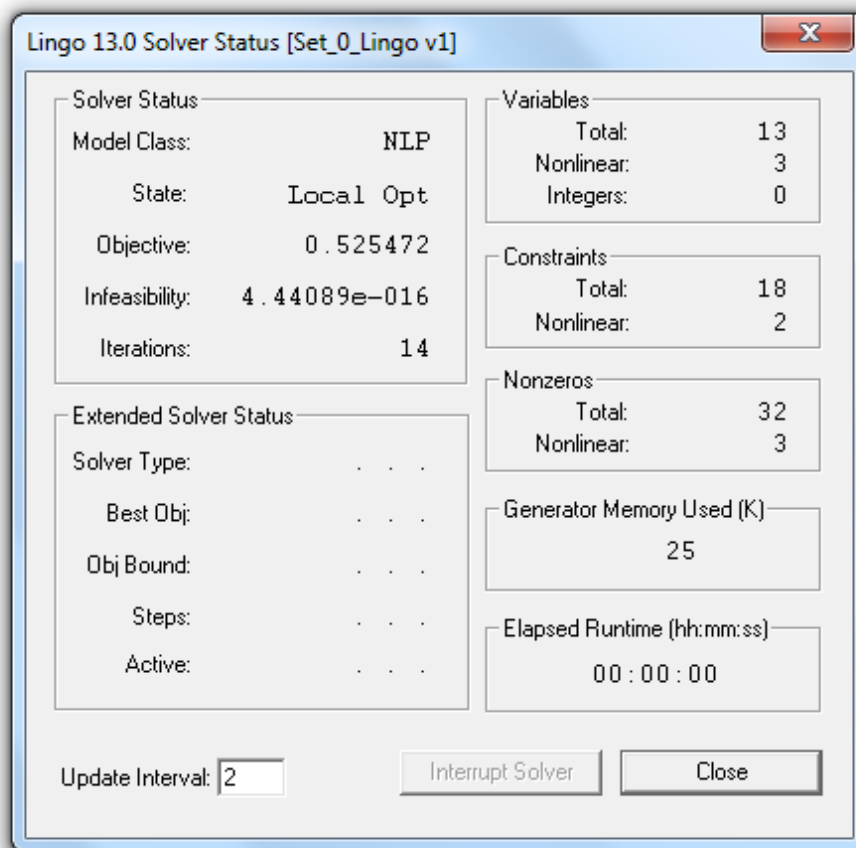


Figura 5.5 – *Lingo Solver Status*

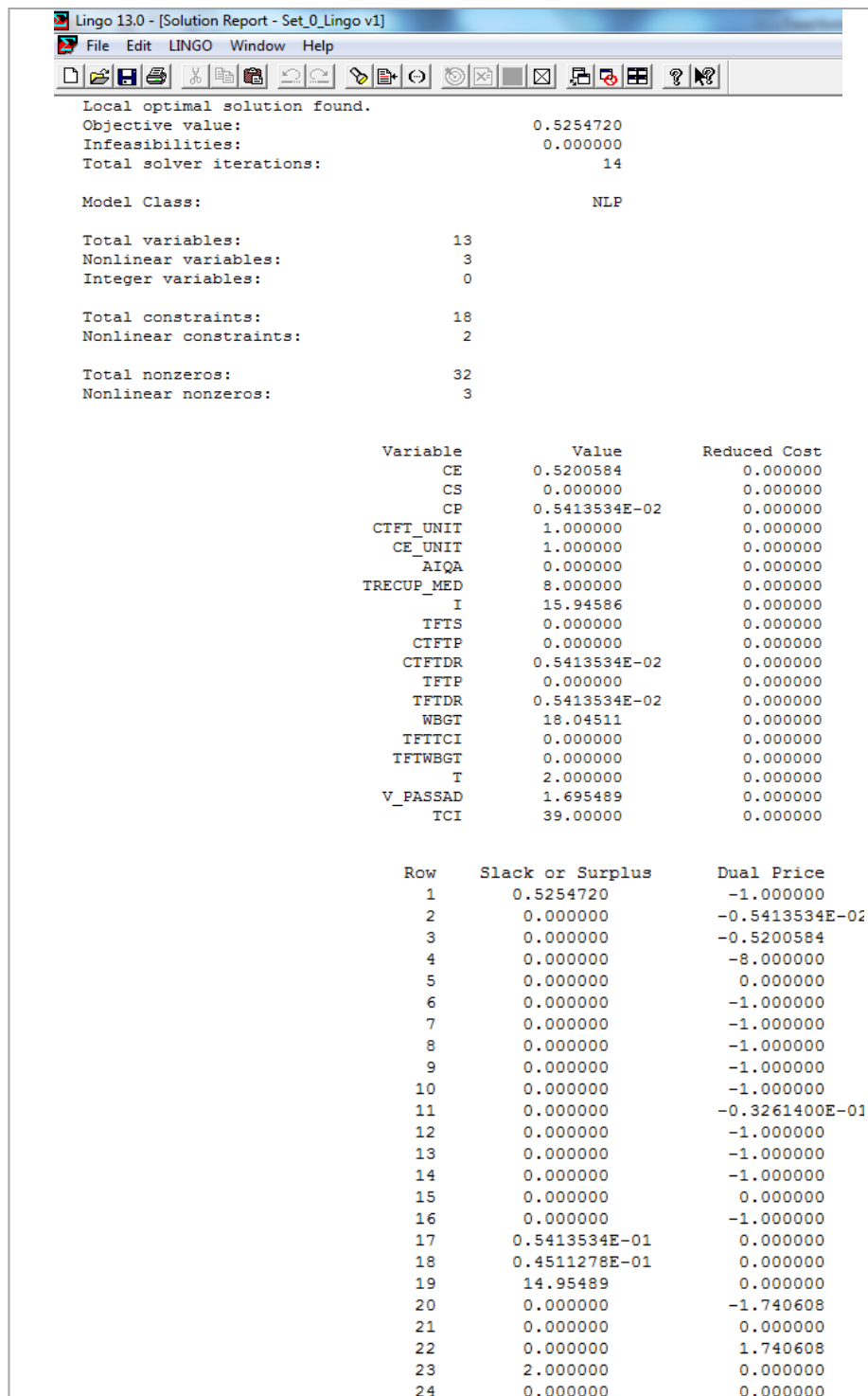
O tipo de informação indicado na figura 5.5 é de caracterização geral do problema/solução, nomeadamente:

- Classe do modelo: NLP (*NonLinear Problem*);
- Estado/condição: Ótimo local;
- Valor da função objetivo;
- Indicação do número de variáveis, restrições e valores não nulos, com discriminação do número de valores não lineares;
- Número de iterações, consumos de memória e de tempo de processamento para se obter a solução;

Os resultados detalhados para o ‘modelo exemplo’ utilizado (*Set 0_T*) são enumerados na figura 5.6.

De notar que essa listagem inclui informação complementar à mera solução¹⁷³ do problema. Para análise dos grupos de conteúdos expressos na listagem relativa à solução (figura 5.6) será desejável tecer alguns comentários preliminares que permitam compreender o seu interesse e aplicabilidade.

¹⁷³ Valores das variáveis e da função objetivo.



Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo v1]

File Edit LINGO Window Help

Local optimal solution found.
 Objective value: 0.5254720
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 14

Model Class: NLP

Total variables: 13
 Nonlinear variables: 3
 Integer variables: 0

Total constraints: 18
 Nonlinear constraints: 2

Total nonzeros: 32
 Nonlinear nonzeros: 3

Variable	Value	Reduced Cost
CE	0.5200584	0.000000
CS	0.000000	0.000000
CP	0.5413534E-02	0.000000
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000
CE_UNIT	1.000000	0.000000
AIQA	0.000000	0.000000
TRECUP_MED	8.000000	0.000000
I	15.94586	0.000000
TFTS	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	0.000000
CTFTDR	0.5413534E-02	0.000000
TFTP	0.000000	0.000000
TFTDR	0.5413534E-02	0.000000
WBG	18.04511	0.000000
TFTICI	0.000000	0.000000
TFTWBG	0.000000	0.000000
T	2.000000	0.000000
V_PASSAD	1.695489	0.000000
TCI	39.00000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.5254720	-1.000000
2	0.000000	-0.5413534E-02
3	0.000000	-0.5200584
4	0.000000	-8.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000
8	0.000000	-1.000000
9	0.000000	-1.000000
10	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-0.3261400E-01
12	0.000000	-1.000000
13	0.000000	-1.000000
14	0.000000	-1.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	-1.000000
17	0.5413534E-01	0.000000
18	0.4511278E-01	0.000000
19	14.95489	0.000000
20	0.000000	-1.740608
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	1.740608
23	2.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000

Figura 5.6 – Lingo Solution Report

Sucintamente:

- Num primeiro grupo (primeiras doze linhas), é duplicada a informação já sintetizada na figura 5.5, sendo válidas as notas explicativas produzidas no momento da sua apresentação, considerando-se desnecessário efetuar aqui a sua repetição;

- Num segundo grupo são listadas as 19 variáveis¹⁷⁴, com indicação de valores em duas colunas, designadas por ‘*Value*’ e ‘*Reduced Cost*’. Na primeira (*Value*) são indicados os valores assumidos pelas variáveis na solução final obtida para o problema, enquanto na segunda (*Reduced Cost*) se expressam os valores de custo que se associam ao conceito de ‘*preço a pagar*’¹⁷⁵ para que uma variável que não faz parte da solução, a passe a integrar.
- No último grupo, são referidos os valores das usualmente designadas ‘*variáveis folga*’ (*Slack or Surplus*) que representam a quantidade de recursos disponíveis e não utilizados na solução corrente e, por fim, a coluna ‘*Dual Price*’ que expressa os coeficientes a adotar na construção de um problema ‘simétrico’ do inicial (problema *dual*), para o qual a solução final é idêntica ao do *primal*. A importância do problema *dual*, em termos práticos, pode ser realçada no seguinte exemplo: um grupo de investidores pretende comprar uma empresa otimizando o custo de aquisição (problema de mínimo, *primal*), enquanto o grupo vendedor pretende transacioná-la maximizando o lucro na venda (problema de máximo, *dual*). A transação ocorre para a situação em que ambos os problemas (*primal* e *dual*) conduzem ao mesmo resultado (soluções ótimas coincidentes). Aparte o interesse e importância do tipo de aplicação descrita, no contexto do presente estudo o problema dual não será de ponderar, pelo que os dados constantes na coluna ‘*Dual Price*’ não serão usados nos desenvolvimentos posteriores.

A descrição anterior centrou-se na explicação sumária do tipo de conteúdos que constituem os relatórios de dados produzidos pelo programa *Lingo*, relativos à solução do problema (*Solution Report*). Remete-se para a ‘Discussão de Resultados’ (capítulo 6) a análise dos valores concretos que configuram a solução obtida.

Idêntico critério de apresentação é aplicado ao relatório de saída (opcional) que se apresenta na figura 5.7 (*Range report*), onde se indicam os intervalos de variação em que a solução atual se mantém constante (base inalterada), evidenciando a sensibilidade de cada componente do modelo às variações paramétricas ou de recursos disponíveis.

Também nesta listagem (*output*) são apresentados dois grupos de intervalos distintos: um, relativo às variações dos coeficientes das variáveis na função objetivo e, outro, relativo às variações do termo independente (*RHS*) das expressões algébricas.

Note-se que o programa considera as expressões definidas segundo a seguinte estrutura:

- Primeiro membro – Todas as variáveis e respetivos fatores multiplicativos, estes últimos usualmente designados por ‘*coeficientes tecnológicos*’
- Segundo membro – Termos independentes (*RHS*), que representam o valor disponível do recurso em causa.

¹⁷⁴ Inclui também as constantes definidas.

¹⁷⁵ Também usualmente designado por ‘*custo de oportunidade*’.

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo v1]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	2.830555	INFINITY
CP	1.000000	INFINITY	0.7389412
I	0.000000	0.9231571E-01	INFINITY
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
WBG	NONLINEAR	INFINITY	0.9850086E-01
TFTTCI	NONLINEAR	INFINITY	0.7406080
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	INFINITY
T	0.000000	0.7406080	INFINITY
V_PASSAD	0.000000	0.8693810	INFINITY
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.5200584
8	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
11	35.20000	0.5413534E-01	15.94586
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	0.5413534E-02
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	0.5413534E-01
18	18.00000	0.4511278E-01	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	14.95489
20	4.400000	0.000000	0.000000
21	3.740000	INFINITY	1.695489
22	2.000000	0.000000	0.000000
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

Figura 5.7 – Lingo Range Report

Para cada um dos grupos de intervalos indicados, são reportados os valores da solução atual (*Current Coefficient* e *Current RHS*) e os acréscimos e decréscimos admissíveis (*Allowable Increase* e *Allowable Decrease*) para que a solução ótima inicialmente encontrada para o problema se mantenha.

Na descrição antecedente identificaram-se os diferentes relatórios de dados e resultados produzidos pelo *software Lingo* (figuras 5.4 a 5.7), através da sua aplicação ao problema a otimizar (*Set 0_T*). Para além da listagem dos dados concretos, a exposição foi conduzida no sentido de explicitar sucintamente os diversos tipos, características e aplicações da informação que integra os *outputs*. Considerando que a estrutura dos relatórios é permanente, nas sucessivas execuções do programa, os esclarecimentos anteriores mantêm-se válidos e atuais, não se repetindo nos desenvolvimentos posteriores.

Finalizando a apresentação deste ponto e capítulo, refere-se que as listagens de resultados produzidos pela aplicação do *software Lingo* à resolução de outras variantes do modelo, a simular e analisar no capítulo seguinte, serão apresentados no anexo 5.5.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo descreve-se a análise crítica e comparativa dos resultados obtidos com base nos dados mostrados no corpo do capítulo precedente. Como então se referiu e neste momento se relembra, na descrição seguinte será privilegiada a apresentação da informação num formato gráfico, para melhor visualização de resultados comparados e compreensão de tendências, remetendo-se para os quadros de dados ‘fonte’ a leitura de valores pontuais e concretos, sempre que tal se verifique desejável ou necessário. A exceção a este procedimento ocorre para a análise de sensibilidade ao modelo, a qual se baseia nas listagens tabelares de resultados, produzidos pelo *software* utilizado.

A exposição posterior deste capítulo segue a estrutura adotada na apresentação de dados (cap. 5), incidindo, separadamente, em cada uma das versões do modelo a estudar (*Set 0* e *Set 1*), finalizando-se com a mencionada análise de sensibilidade.

6.1 Análise de resultados obtidos para o *Set 0_T*

A tabela de resultados obtida para o *Set 0_T*, apresentada no quadro 5.3, tem a tradução gráfica que se representa na figura 6.1:

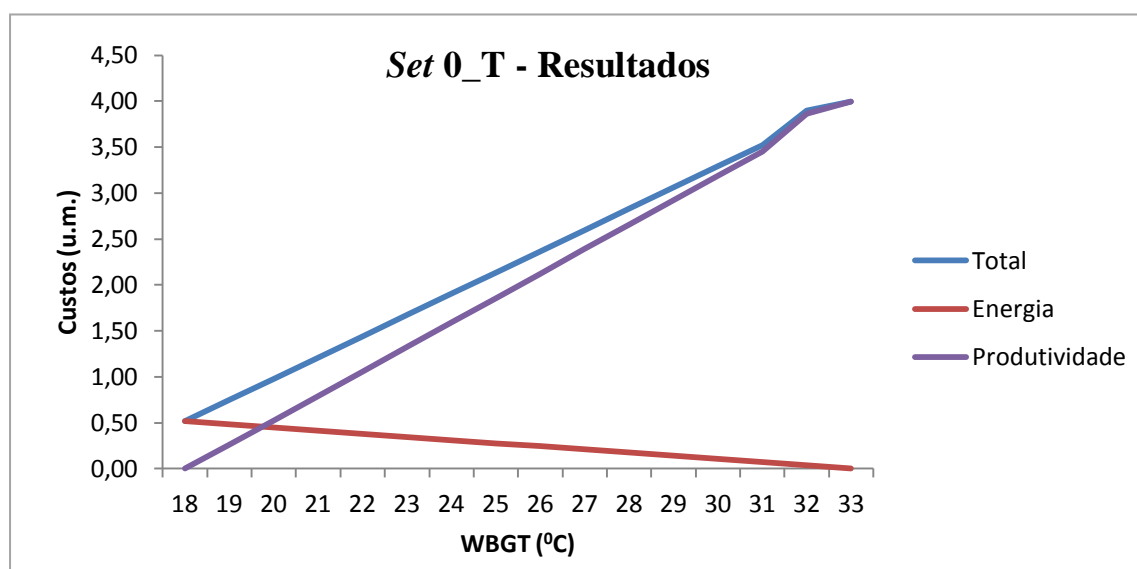


Figura 6.1 – Resultados globais para *Set 0_T*

A observação da figura 6.1 permite constatar que o custo total para $WBGT = 18^{\circ}C$ é o custo correspondente unicamente à parcela de energia, enquanto para $WBGT = 33^{\circ}C$ corresponde apenas à componente produtividade, o que está de acordo com os pressupostos considerados: ambientes térmicos com $WBGT = 18^{\circ}C$ não afetam o desempenho dos indivíduos, pelo que não existe quebra de produtividade (ou seja, custos associados a esse fator são nulos). Por sua vez, os custos com a energia elétrica consumida para colocar o índice $WBGT$ no seu patamar mínimo ($18^{\circ}C$) são máximos. No outro

extremo ($WBGT = 33^{\circ}\text{C}$), a situação inverte-se (custos de energia nulos e custos com perda de produtividade máximos).

É de notar que para os valores e pressupostos indicados, o custo mínimo (ponto ótimo) ocorre para o valor extremo $WBGT = 18^{\circ}\text{C}$, o que sucede devido:

- Funções parcelares serem lineares¹⁷⁶;
- Declive da função ‘produtividade’, em módulo, ser superior ao da função ‘custo de energia’, pelo que o declive da função ‘custo total’, resultante da adição de ambas, terá sinal idêntico ao da parcela de maior ‘peso’ relativo, isto é, da que apresenta maior inclinação (‘produtividade’).

Para testar o comportamento do modelo (*Set 0_T*) em situações diversas da indicada, foram incorporadas alterações que modificam a natureza dos dois aspetos enumerados, as quais consubstanciam as variantes A e B, cujos resultados foram apresentados nos quadros 5.4 a 5.6, os quais seguidamente se representam, graficamente. De salientar que o estabelecimento dessas duas variantes baseia-se na possibilidade de ocorrência de:

- Alterações do preço de mercado de comercialização de energia. Nessa perspetiva, foram considerados dois níveis de acréscimo de custo, em valores suficientes para alterar o tipo de resposta do modelo ($5x$ e $10x$);
- Preponderância da componente associada aos limites de referência para o índice $WBGT$, no cálculo do tempo fora da tarefa (TFT_p). No intervalo considerado (18°C - 33°C) e para as condições estipuladas (aclimação, ventilação e taxa metabólica), essa função não é linear.

Repare-se que o tipo de alterações subjacentes a cada uma destas duas vertentes, num plano prático, possui elevada probabilidade de ocorrência, pelo que se perspetiva interessante conhecer o modo como o modelo incorpora e responde a essas novas ‘realidades’ de valores de entrada.

De seguida analisam-se, em separado, os resultados obtidos (quadros 5.4 e 5.5) para cada uma das variantes (A e B). Posteriormente, conjugam-se as alterações aos dados de entrada (quadro 5.6), correspondentes à ocorrência simultânea das duas variantes (incremento do preço unitário de comercialização de energia elétrica e preponderância dos efeitos da componente $WBGT$ sobre os da TCI, no cálculo de TFT_p , o que se traduz na não linearidade de pelo menos uma função relacional) e analisam-se os resultados finais obtidos.

Comece-se pela observação dos gráficos das figuras 6.2 e 6.3, ambos relativos à variante A e correspondentes, respetivamente, a acréscimos de custo de energia de $5x$ e $10x$ (ver dados fonte no quadro 5.4).

A comparação entre os resultados apresentados permite retirar as seguintes ilações:

- O aumento do custo de energia em $5x$ (fig. 6.2) não altera a relação inicial entre os custos de energia e produtividade, pelo que o declive da função de custo total se

¹⁷⁶ Excecionando a ‘perturbação’ que ocorre para $WBGT \geq 32^{\circ}\text{C}$, devido à inversão da dominância entre os valores de TFT_{tci} e TFT_{wbgt} que, consequentemente, afetam os valores finais de TFT_p e produtividade.

mantem positivo, analogamente ao evidenciado na figura 6.1, representativa da situação inicial;

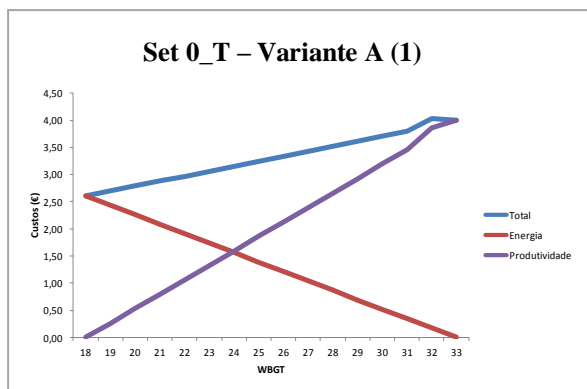


Figura 6.2 – Incremento dos custos de energia em 5x (Variante A)

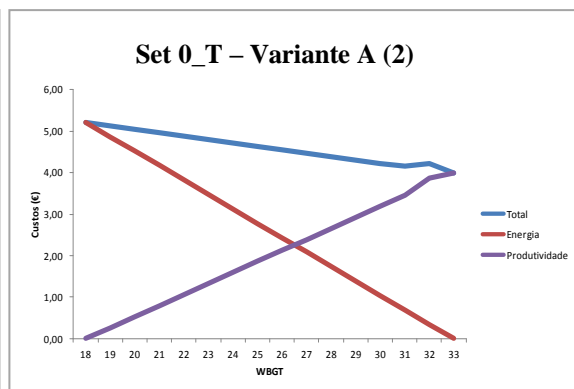


Figura 6.3 – Incremento dos custos de energia em 10x (Variante A)

- Quando o custo de energia é incrementado em 10x (fig. 6.3), o declive da função custo total apresenta um valor negativo, o que evidencia a alteração da parcela preponderante no cálculo do resultado final, isto é, a componente ‘custo de energia’ sobrepõe-se à componente ‘custo de produtividade’. Neste caso, o ponto ótimo de funcionamento (custo mínimo) ocorre no extremo oposto (WBGT = 33°C), correspondendo ao mínimo da função parcelar cuja escala de valores é dominante (‘custo energia elétrica’);
- A linearidade¹⁷⁷ das funções constituintes do modelo conduz a que o ponto ótimo ocorra, obrigatoriamente¹⁷⁸, num dos pontos extremos da escala do índice WBGT, situação que se verifica, para qualquer das opções analisadas.

As ilações retiradas dos dados disponíveis são consistentes com o previsto, para cada uma das duas opções da variante A, pelo que se pode considerar que o modelo fornece resultados em conformidade com a realidade expetável, segundo essa perspetiva.

Para análise da variante B, tome-se como base a figura 6.4, onde se traduzem, graficamente, os dados expressos no quadro 5.5.

A consequência da aplicação desta variante (B) é a redefinição da função custo associada ao elemento produtividade, a qual deixa de ser linear, por força da primazia da componente indexada ao limite de referência WBGT (ver anexo 5.3), sobre a parcela correspondente ao limite TCI do indivíduo. Este aspeto é refletido no gráfico da figura 6.4 pela inflexão da função produtividade quando WBGT = 25°C.

Esta variante, aplicada à situação de partida, não altera o ponto ótimo, que continua a ocorrer para WBGT = 18°C. No entanto, a sua conjugação com os resultados obtidos para

¹⁷⁷ Tomando em consideração a exceção já referida anteriormente.

¹⁷⁸ Excetua-se o caso particular em que a função custo total apresente um declive nulo (graficamente representado por um segmento de reta horizontal), para o qual estamos em presença de pontos ótimos múltiplos (todos).

a variante A conduz à obtenção de novo ponto ótimo, o qual se constata vir a ocorrer para $WBGT = 25^{\circ}\text{C}$, conforme se pode ver nas figuras 6.5 (A5x) e 6.6 (A10x).

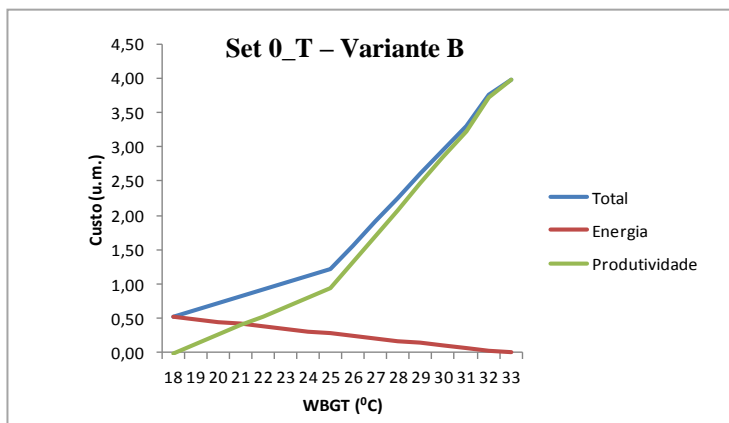


Figura 6.4 – Inversão do fator preponderante no cálculo de TFT_p (Variante B)

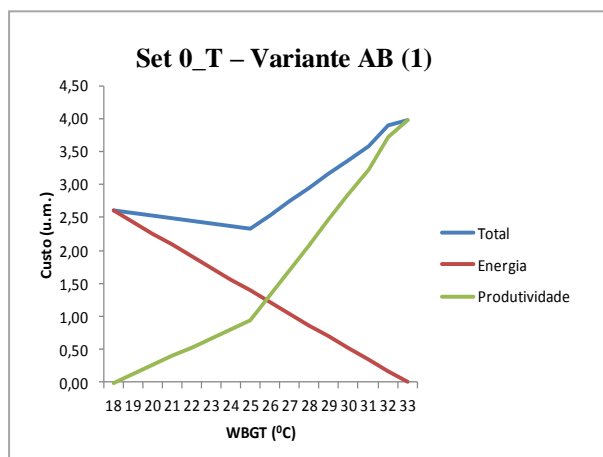


Figura 6.5 – Variantes A (5x) e B, conjugadas

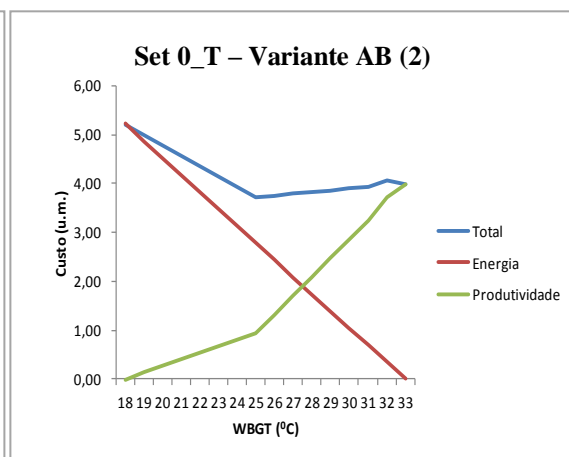


Figura 6.6 – Variantes A (10x) e B, conjugadas

A obtenção do custo mínimo (ponto ótimo) para um valor de $WBGT$ diferente dos extremos do intervalo admissível (em ambos os casos, para $WBGT = 25^{\circ}\text{C}$) é um reflexo da não linearidade da função ‘produtividade’, o que também era esperado, desde que exista ‘equilíbrio’ entre a ordem de grandeza dos valores parcelares¹⁷⁹, o que foi realizado pela introdução de custos de energia elétrica acrescidos (5x e 10x).

Em suma, a simulação do modelo (*Set 0_T*), para as diversas situações consideradas (inicial e variantes A, B e AB), permitiu determinar valores de custo mínimo (pontos ótimos) e tendências de comportamento das funções globais que se ajustam à realidade perspectivada. Portanto, considera-se que o modelo conceptual passou, com sucesso, esta bateria de testes preliminares efetuados ao seu desempenho, o que permite sustentar a sua

¹⁷⁹ Se os valores das funções forem de ordem de grandeza muito díspar, entre si, a função dominante tende a anular o efeito da outra, o que se traduz na obtenção do ponto ótimo para um dos valores extremos de $WBGT$.

aplicabilidade para os propósitos estipulados. A análise de sensibilidade global, executada no ponto 6.3, irá corroborar esta ideia, como adiante se verá.

6.2 Análise de resultados obtidos para o *Set 1*

Considere-se agora o outro modelo alternativo - que se designou por *Set 1* - onde as funções que relacionam a produtividade com as condições de ambiente térmico no modelo base, de partida (*Set 0_T*), foram substituídas pelo ‘*modelo de produtividade*’ proposto por Koehn e Brown (1985) e analise-se, previamente, o comportamento deste modelo. Para tal, estabeleça-se a variação unitária dos valores da temperatura do ar (T_a), dentro do intervalo definido pelos extremos do domínio da função, respetivamente, 70°F ($\approx 21^\circ\text{C}$) e 120°F ($\approx 49^\circ\text{C}$), conjugando-os com a variação do grau de humidade (H_r) entre 55% e 95%, em incrementos com um passo igual a 10%.

Note-se que o intervalo de valores de humidade relativa referido (55% - 95%)¹⁸⁰, associado a temperaturas elevadas, permite testar o comportamento do modelo para as condições ambientais que tendem a ocorrer no contexto mineiro, situação de especial importância para o âmbito do presente trabalho. Nesse sentido, não se efetuam testes para valores de humidade relativa (H_r) inferiores a 55% por não serem relevantes para o tipo de aplicação pretendida.

A resposta dinâmica do modelo, para as condições de entrada referidas, pode ser vista na figura 6.7, onde se representam, graficamente, os resultados sintetizados no quadro 5.7.

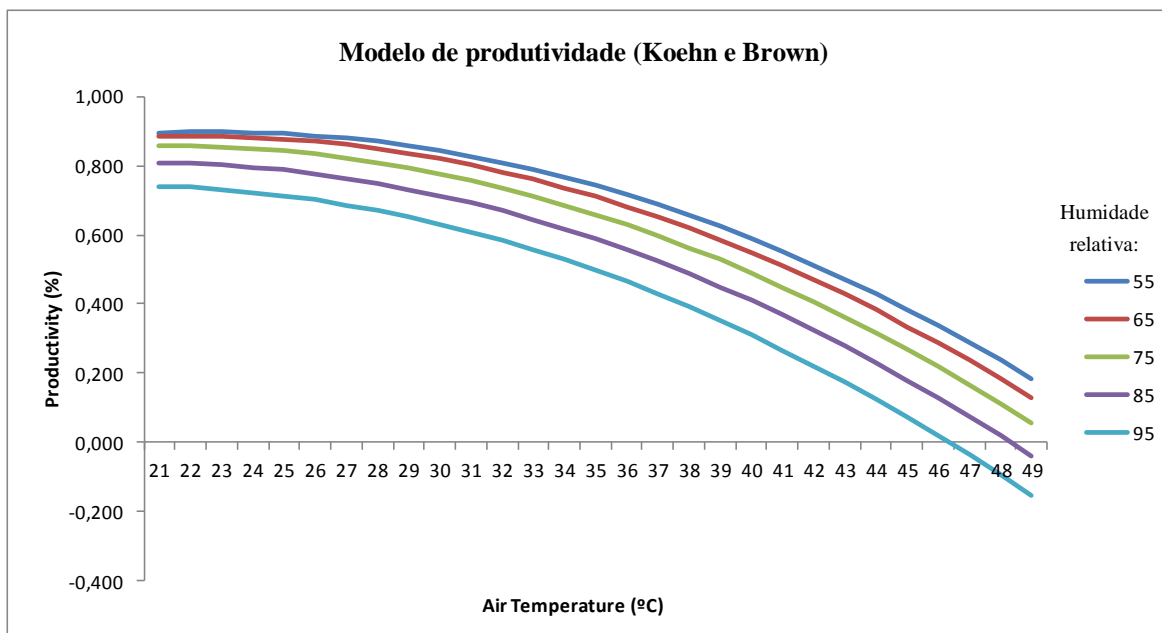


Figura 6.7 – Resposta do modelo de Koehn e Brown

¹⁸⁰ Em consonância com os valores adotados pelos autores no estudo que realizaram, para possibilitar análises comparativas.

Uma nota intercalar para se referir que a unidade de temperatura utilizada no sistema internacional de unidades e ao longo do presente trabalho é o grau *Celsius* (°C). Sempre que nada seja expresso em sentido contrário, essa é a usada. Porém, o modelo em apreciação, de origem americana, foi desenvolvido com base noutra unidade, o grau *Fahrenheit* (°F). Assim, os valores a introduzir na equação são, forçosamente, nessa unidade, pois de contrário os resultados produzidos não corresponderiam aos obtidos pelos autores da fórmula. Nesta perspetiva, manteve-se a unidade °F nos cálculos efetuados.

No entanto, na apresentação de resultados, como por exemplo na figura 6.7, é utilizada a escala *Celsius*, para garantir a coerência com o restante texto e, também, melhorar a perceção e sensibilidade acerca da variável em causa, por parte de um público leitor ‘europeu’. A correspondência entre os valores das duas escalas¹⁸¹, para o domínio da função, é apresentada nas duas primeiras colunas do quadro 5.7.

Concluída a nota explicativa sobre a utilização de unidades, no que concerne à medição da temperatura do ar, segue-se a exposição, por pontos, dos comentários suscitados pela análise da figura 6.7, representativa dos resultados indicados no quadro 5.7, obtidos pela equação 4.33 para os valores do domínio da variável T_a :

- A função não linear, contínua, proposta por Koehn e Brown, apresenta um andamento monótono decrescente (nos casos de $H_r = 75, 85$ e 95%), entre os valores máximos de produtividade, obtidos para o extremo mínimo da escala de temperatura - 21°C - e os mínimos, que ocorrem para o outro extremo, $T_a = 49^\circ\text{C}$. A exceção a este comportamento monótono ocorre para as curvas representativas de humidades relativas de 55% e 65% , para as quais se verifica um crescimento inicial, até atingirem um máximo de produtividade que ocorre, respetivamente, para os valores de T_a de 23°C e 22°C , mantendo iguais tendências decrescentes a partir dessas temperaturas. Em suma, os valores de produtividade máxima (dentro do intervalo de temperaturas examinado) ocorrem para valores de temperatura compreendidos no intervalo $[21^\circ\text{C}, 23^\circ\text{C}]$, dependendo dos valores de humidade relativa considerados.

Note-se que essa evolução pode ser interpretada à luz das considerações enunciadas no capítulo 3, em resultado da pesquisa bibliográfica realizada sobre conforto e stresse térmicos. Recapitulando, verificou-se ser consensual a assunção de que o desempenho laboral dos indivíduos é máximo quando o ambiente térmico lhes propicia condições de conforto térmico. Fora dessa ‘zona’ existe quebra de rendimento, quer por excesso de frio (temperaturas inferiores), quer por excesso de calor (temperaturas superiores)¹⁸².

Da análise ao ‘andamento’ geral do gráfico, constata-se que o mesmo reflete essas características, considerando que as condições de conforto ocorrem no intervalo de $[21^\circ\text{C}, 23^\circ\text{C}]$ e que para temperaturas superiores ocorrem perdas graduais e sistemáticas de produtividade. Ainda sobre este aspeto, é de mencionar que a gama de temperaturas operativas que se aconselham para se assegurarem condições de

¹⁸¹ Conversão entre °F e °C (e vice versa): $^\circ\text{F} = ^\circ\text{C} \cdot 1.8 + 32$ ou $^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) / 1.8$.

¹⁸² Esta é a situação em estudo, visto que a expressão utilizada para a obtenção de resultados é a proposta, pelos autores, para ambientes quentes.

conforto é de $23.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$, de acordo com os critérios de ‘desenho’ para a climatização de espaços, indicadas na tabela A.5 da norma ISO 7730: 2005, tomando como exemplo um nível de atividade correspondente a 93 W/m^2 , em ambientes quentes (situação de verão) e determinadas condições de assimetria (teto, paredes) nos valores da temperatura radiante.

Note-se que as condições de atividade na construção civil (onde o modelo foi desenvolvido) são mais exigentes que as consideradas naquele normativo, o que dificulta a obtenção do equilíbrio térmico a estabelecer pelas trocas de calor entre o indivíduo e o ambiente (balanço térmico), pelo que as condições de conforto tendem a ser atingidas para valores de temperatura inferiores, o que poderá justificar o intervalo obtido¹⁸³;

- O decréscimo de produtividade - medido em percentagem do valor máximo padrão - apresenta uma grande amplitude. Tomando como exemplo a curva correspondente a $H_r = 55\%$ (situação menos condicionante para o desempenho humano, de entre as apresentadas), os valores de produtividade¹⁸⁴ variam entre 0.898 e 0.183 (aprox.), quando a temperatura sobe de 23°C para 49°C , o que representa uma quebra de produtividade na ordem de 71.5%. Este é um resultado que corrobora a perceção consensualmente veiculada, de que as condições de ambiente térmico (quentes, neste caso) possuem um forte impacte nos níveis de produtividade;
- O efeito da humidade relativa na produtividade é também visível no gráfico em análise. Veja-se que, para qualquer temperatura, o aumento de humidade relativa (de 55% até 95%) produz alteração dos valores iniciais, no sentido da redução dos níveis de produtividade, o que também está de acordo com a informação consensual publicada sobre o assunto (conforme relatado na revisão bibliográfica, capítulo 3);
- Complementarmente, para melhor se explicitar o efeito da humidade relativa – enquanto fator condicionador da produtividade – é desejável utilizar uma escala mais ‘fina’. Para o efeito, veja-se a figura 6.8:

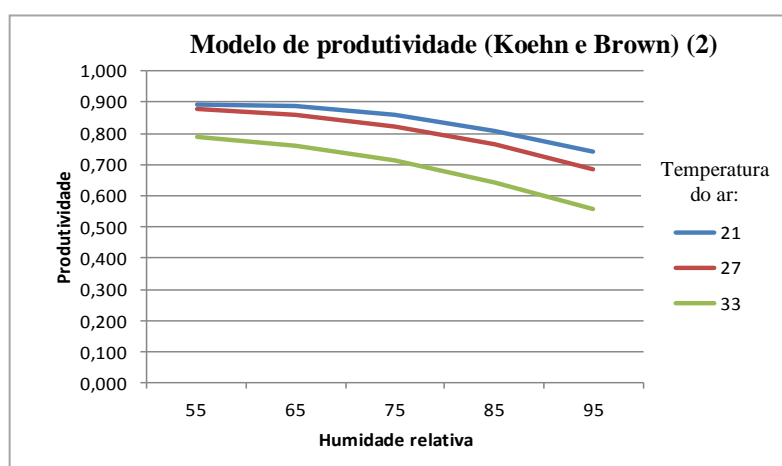


Figura 6.8 – Modelo Koehn e Brown. Exemplo relação H_r – P

¹⁸³ Valores extremos do intervalo inferiores em 1°C , relativamente aos propostos no exemplo da norma ISO 7730: 2005.

¹⁸⁴ Ver quadro 5.7.

onde se analisam as variações de produtividade em função de alterações do grau de humidade (55% a 95%), para três exemplos de valores de temperatura do ar, nomeadamente, $T_a = 21^\circ\text{C}$ (mínima), 27°C e 33°C (máxima), em concordância com o intervalo estipulado para o cálculo de custos, no presente estudo (ver fig. 5.3). Introduce-se aqui um *parêntesis* para se referir que a seleção destas três ‘temperaturas exemplo’ não condiciona a generalização da análise subsequente, pois a tendência de evolução dos resultados $H_r - P$ é semelhante para qualquer patamar de temperatura do ar que se considere, conforme se pode constatar pela leitura dos dados expressos no quadro 5.7.¹⁸⁵

Retomando a visualização do gráfico da figura 6.8, constata-se que a produtividade decresce, não linearmente¹⁸⁶, com o aumento do valor da humidade relativa. Repare-se que a quebra é tanto mais acentuada¹⁸⁷, quanto maior o valor de humidade relativa, o que também é consistente com a informação disponível sobre este aspeto: é globalmente reconhecido que o incremento do grau de humidade no ar dificulta a evaporação da sudorese do indivíduo, único mecanismo de autorregulação térmica disponível em ambientes quentes, como é o caso em apreço. Em tais condições, que fomentam uma maior pressão sobre o metabolismo humano, a diminuição da produtividade - quer pela via da diminuição do ritmo de trabalho, quer pelo aumento de pausas e períodos de descanso¹⁸⁸ - será, necessariamente, mais acentuada, como também sugerem os resultados obtidos pelo modelo de Koehn e Brown.

A análise anterior permite salientar que os resultados obtidos, por aplicação do modelo de produtividade de Koehn e Brown, são congruentes com as realidades e relações funcionais expectáveis (entre as variáveis temperatura do ar, humidade relativa e níveis de produtividade), numa perspetiva de “tendências” e de acordo com os estudos disponíveis.

No entanto, no âmbito do presente estudo, é também importante analisar a coerência global do modelo, bem como o seu potencial de adaptação a outras aplicações, com condições iniciais distintas. Nesse sentido, segue-se a análise de outros aspetos complementares à análise anterior, que possibilitam avaliar essas duas vertentes.

Para analisar a congruência da informação, comparam-se os resultados calculados por aplicação direta da função (equação 4.33) com os indicados pelos autores, na “tabela 6”¹⁸⁹ (que se apresenta no anexo 6.1), relativa ao estudo que efetuaram sobre atividades de construção civil.

De notar que a referida tabela (ver anexo 6.1) apresenta valores para as situações de ambientes frios [-20°F , 50°F] e ambientes quentes [70°F , 120°F], na qual os autores estipularam o valor 1.00 para a produtividade em ambientes ‘neutros’ [50°F , 70°F], intervalo fora do domínio de aplicabilidade de qualquer das funções propostas. Tendo

¹⁸⁵ Numa análise ‘linha a linha’.

¹⁸⁶ Linhas curvas (não lineares) e não retas (lineares).

¹⁸⁷ Concavidade para baixo, declive crescente (em módulo).

¹⁸⁸ Mecanismos integrados no Set 0 e amplamente focados nos capítulos precedentes.

¹⁸⁹ Koehn e Brown (1985), pág. 135.

presente que o corrente estudo é focado apenas nos ambientes de características quentes, apresenta-se no quadro 6.1 o excerto da referida tabela, para o intervalo [70°F, 120°F], sobre o qual incidem as considerações seguintes.

Quadro 6.1 – Excerto da ‘Table 6’, em Koehn e Brown (1985)

T _a		H _r (%)									
°F	°C	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
70	21	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
80	27	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,93
90	32	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,90	0,88	0,85	0,82	0,78
100	38	0,81	0,81	0,80	0,79	0,77	0,74	0,71	0,67	0,61	0,54
110	43	0,58	0,58	0,58	0,57	0,55	0,51	0,47	0,41	0,32	0,21
120	49	-	0,28	0,28	0,28	0,25	0,21	0,15	0,07	-	-

Um primeiro comentário acerca dos valores que ocorrem para as situações de fronteira, isto é, nos extremos do intervalo de temperatura:

- Na figura 6.7 verifica-se que, a temperaturas iguais ou superiores a 46°C e graus de humidade relativa iguais ou superiores a 85%, correspondem valores de produtividade negativos, o que configura uma impossibilidade prática. No quadro 6.1, esses valores são omissos, situação mais realista. Esta constatação, se bem que represente uma dissonância entre resultados, não é relevante para o presente contexto, visto que o âmbito de aplicação previsto para o *Set 1* se restringe ao intervalo de temperaturas [21°C, 33°C], muito longe, portanto, daquelas temperaturas;
- No extremo oposto, T_a = 21°C, constata-se no quadro 5.7 que a produtividade varia entre 0.894 (H_r = 55%) e 0.741 (H_r = 95%), enquanto no quadro 6.1, para idênticas situações, é apresentado um valor de produtividade constante, igual ao rendimento ‘standard’ (P = 1.00).

Esta discrepância pode considerar-se significativa, pois para o valor de H_r mais elevado, por exemplo, representa uma diferença de, aproximadamente, 25.9% que não pode ser negligenciada. Relembra-se que os autores definem como domínio para a função o intervalo [70°F, 120°F], pelo que não se encontra justificação para a adoção dos valores unitários apresentados no quadro 6.1;

- Ainda sobre a mesma zona do intervalo de temperatura e de acordo com uma das observações efetuadas anteriormente - acerca da evolução da curva que representa a situação para H_r = 55% - relembra-se que, nessa situação, a função é crescente entre 21°C e 23°C, onde atinge o valor máximo de produtividade, decrescendo para temperaturas superiores.

Essa constatação entra em aparente contradição com os valores indicados no quadro 6.1, porquanto não parece fazer sentido, de um ponto de vista prático, que a

produtividade comece por decrescer¹⁹⁰, seguidamente cresça¹⁹¹ e posteriormente volte a decrescer¹⁹², conforme se aumenta a temperatura, mantendo a humidade relativa constante.

Como consequência deste primeiro grupo de comentários, constata-se existirem algumas incoerências entre os resultados produzidos pela aplicação da função e os que são apresentados pelos autores, o que constitui um aspeto menos positivo na análise comparativa ao desempenho do modelo e na avaliação sobre a congruência da informação por ele produzida.

Quanto ao segundo aspeto a avaliar - o potencial de adaptação do modelo de Koehn e Brown a novos contextos – evidenciam-se dois elementos que se consideram fundamentais nesse contexto, nomeadamente:

- Formulação ‘fechada’ – a função que constitui o modelo possui termos de 1ª e 2ª ordem relativos às duas variáveis independentes (T_a e H_r), a que se adiciona um termo cruzado e outro independente. Note-se que não é disponibilizada a informação que serviu de base ao seu desenvolvimento e parametrização, pelo que a função ‘funciona’ como uma ‘caixa negra’, numa lógica de *input/output*, sem possibilidade de modificação do conteúdo do elemento ‘processador’. Para concretizar esta ideia, veja-se o seguinte exemplo:
 - ✧ a produtividade é apresentada como uma percentagem do valor de eficiência de operação padrão (*standard*), através da normalização da função (eq. 4.33) pelos respetivos valores máximos. Não sendo facultados elementos adicionais que permitam identificar o valor da constante (k) a utilizar para normalizar a função, foram testadas algumas alternativas com o objetivo de equiparar os valores obtidos pela função aos indicados no estudo dos autores (quadro 6.1). Por exemplo, da utilização de um $k = 0.9$, resultou a correspondência dos resultados ‘função-estudo’ para o intervalo de temperaturas [21°C, 49°C] e uma H_r de 55%. No entanto, essa constante de normalização (k) não produz a convergência simultânea dos resultados representativos de outras situações, com humidades relativas distintas. Situações análogas ocorrem para outros valores de k testados. Portanto, ao não serem conhecidos os dados fonte (neste caso, os valores de produtividade padrão) o processo de normalização da função é dificultado, como se infere deste exemplo;
- Limitações de aplicação do modelo – sobre este aspeto, os autores que desenvolveram o modelo indicam, nas conclusões do seu estudo¹⁹³, que os resultados são afetados em situações em que o trabalho a desenvolver é mais ‘pesado’ ou envolva tarefas de maior complexidade, duração e concentração mental. Referem, ainda, que outros fatores como a idade, condição física, motivação, experiência e as capacidades físicas e mentais dos trabalhadores devem

¹⁹⁰ De $P = 1$ (máximo absoluto) para $P = 0.894$ (a 21°C).

¹⁹¹ Para $P = 0.898$ (a 23°C).

¹⁹² T_a superiores a 23°C.

¹⁹³ Ver Koehn e Brown (1985), pg. 136.

ser considerados. Por último, salientam a importância da aclimação, enquanto fator que influencia fortemente a produtividade.

Na essência, todos estes elementos - que condicionam os resultados em termos de produtividade - são focados em diversos estudos sobre esta temática, sendo uma matéria consensual. Porém, a forma de incorporar esses efeitos na função do modelo é, neste estudo, omissa, não sendo apresentado qualquer caminho que promova a adaptação do modelo a essas eventuais alterações.

Como síntese da exposição precedente, referem-se os principais comentários ao desempenho do modelo proposto por Koehn e Brown:

- Os resultados mostram relações entre as variáveis temperatura do ar, humidade relativa e níveis de produtividade, que correspondem às tendências esperadas e consensualmente aceites, de que resulta uma avaliação positiva quanto ao desempenho geral do modelo;
- A comparação de resultados obtidos diretamente por aplicação da função com os apresentados pelos autores, para idênticas condições, revelou algumas discrepâncias, o que penaliza a congruência da informação tratada e, consequentemente, a fiabilidade de aplicação do modelo;
- A adaptação do modelo a novas realidades é dificultada pela utilização de uma função única, global, cuja parametrização agrupa o efeito total do conjunto de fatores que condicionam o problema, sem possibilidade de individualização dos contributos das suas parcelas constituintes. Nesse sentido, a função é considerada ‘*imutável*’, face à ausência de conhecimento dos ‘dados fonte’ que estiveram na origem do seu desenvolvimento, o que impede a sua adaptação a outros contextos, que incluam novas condições iniciais, como sejam, por exemplo, alterações no tipo de tarefa ou no estado de aclimação do trabalhador, salientado pelos autores Koehn e Brown como fatores que alteram os resultados obtidos.

Em suma, os testes preliminares efetuados ao modelo de produtividade que integra o *Set 1* produziram resultados que evidenciam algumas debilidades que desaconselham a sua aplicação posterior.

Em especial, a fraca versatilidade do modelo para aplicação a outras realidades, é determinante na decisão de suspender a sua utilização futura, no âmbito do presente trabalho, que visa, em fases posteriores, a aplicação do modelo aos contextos laboratorial e de trabalho real.

Naturalmente, a continuidade do processo de execução de testes ao *Set 1* - nomeadamente a análise e discussão dos dados constantes nos quadros 5.8 e 5.9 - com o objetivo de analisar a sua resposta global e integrada, deixa de fazer sentido, nesta fase, pois:

- O modelo de produtividade de Koehn e Brown - em que se baseia o *Set 1* e que constitui a parcela inovadora, em relação ao *Set 0* original - não será utilizado nas etapas seguintes;
- Não foram previstas alterações para adaptação da *função* do modelo (*Set 1*), caso a sua resposta não seja validada, numa dada aplicação. Reforçando a ideia de que o modelo em causa tem uma origem externa, com desenvolvimento desconhecido, ele

é aqui encarado como um sistema ‘fechado’, com direitos de autor, não suscetível de ser modificado. As eventuais modificações funcionais a estabelecer, serão sempre centradas no *Set 0*, o qual integra as relações desenvolvidas no decurso do presente trabalho, de modo desagregado e explícito.

Como consequência da precedente análise aos resultados obtidos nos testes preliminares efetuados a ambos os modelos (*Set 0_T* e *Set 1*), estabelece-se que nos desenvolvimentos posteriores, o *Set 1* será abandonado e apenas será usado o *Set 0_T*, sobre o qual incidirão todos as simulações, análises de sensibilidade e eventuais alterações paramétricas futuras.

Esta circunstância é evidenciada no fluxograma síntese, relativo aos modos de obtenção, validação e sequência de aplicação dos modelos - que se apresenta na figura 6.9 – os quais estão, naturalmente, em concordância com a descrição das quatro fases de aplicação do modelo expostas no início do capítulo 5.

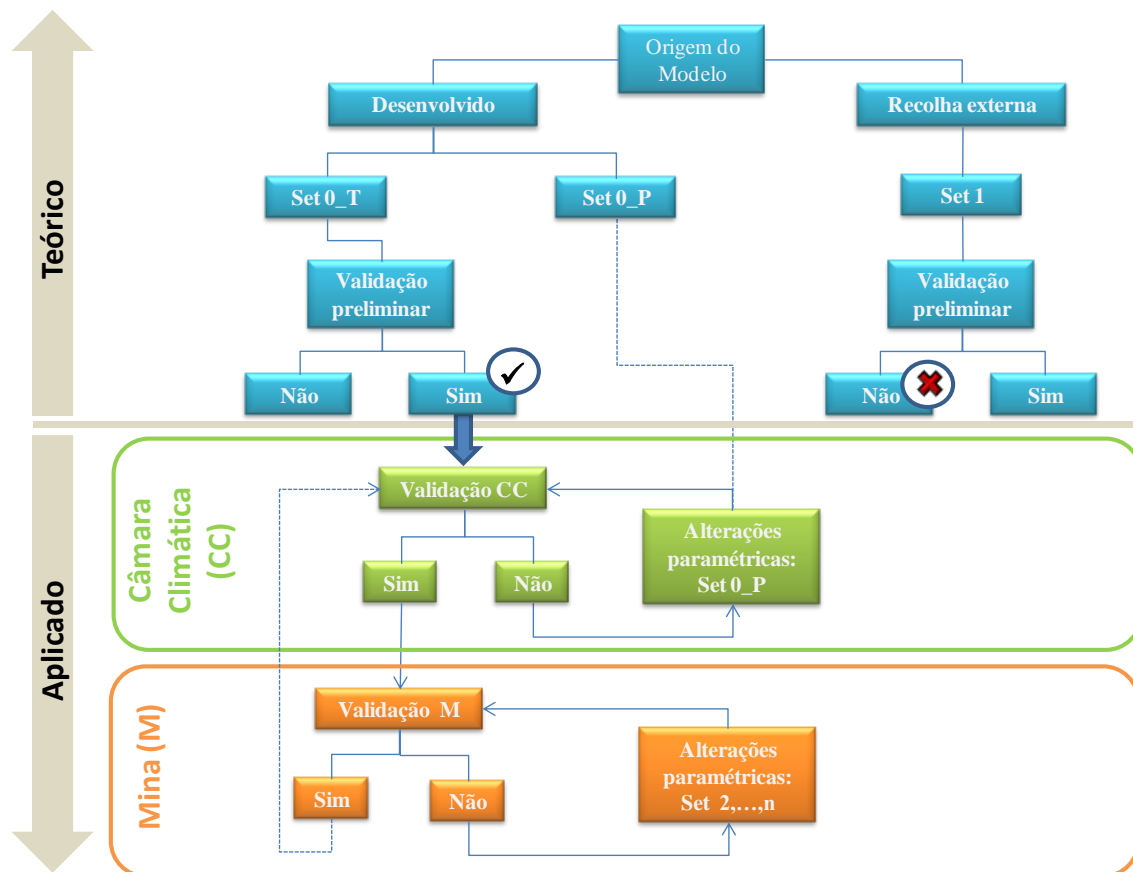


Figura 6.9 – Diagrama síntese do processo de desenvolvimento, validação e aplicação dos modelos

No referido diagrama (fig. 6.9), pretende-se concretizar os ‘*milestones*’ da discussão de resultados efetuada (plano conceptual), bem como as etapas futuras para validação e adaptação dos modelos aos contextos práticos onde irão ser implementados (plano aplicado). Os pontos que refletem o estágio atual são assinalados através do recurso a alguma simbologia gráfica, nomeadamente:

- Um ‘*visto*’ (✓), indica o sucesso de validação do modelo correspondente ao *Set 0_T*, no plano teórico;
- Um ‘*xis*’ (✖), indica a não validação do modelo (*Set 1*), na fase considerada. Neste caso e como anteriormente referido, cessa a sua utilização, não transitando para aplicação nas etapas seguintes;
- A transposição da linha de fronteira entre os planos concetual e prático¹⁹⁴ ocorre apenas para o modelo validado na fase prévia, o que se assinala através de uma seta vertical descendente (azul).

A figura 6.9 permite-nos ter uma visão geral das etapas materializadas no decurso de desenvolvimento do presente trabalho (módulo azul) e das que se perspetivam em progressos futuros (módulos verde e laranja), na linha das considerações realizadas sobre o assunto, nos capítulos precedentes.

6.3 Análise de sensibilidade e comparação de resultados – *Set 0_T*

Neste ponto serão analisadas, primeiramente, as soluções obtidas para o *Set 0_T* inicial, tomando por base a informação apresentada nas figuras 5.4 a 5.7, obtidas com recurso ao *software Lingo*. Numa fase seguinte serão simuladas, no mesmo programa, variantes ao modelo principal (considerando idênticos cenários aos usados nas folhas de cálculo *Excel* e outros adicionais que se justifiquem para o estudo de sensibilidade) e analisadas as respetivas soluções, como suplemento ao estudo focado no modelo inicial, tendo em vista a constatação da compatibilidade e congruência entre a informação obtida pelas duas vias utilizadas (*Excel* e *Lingo*). A consistência dos resultados comparados irá possibilitar a generalização das considerações sobre os mesmos, finalizando-se a discussão sobre o tema. Inicia-se esta exposição pela comparação dos resultados obtidos para o *Set 0_T*, pelos dois ‘instrumentos’ usados, nomeadamente, *Excel* (quadro 5.3 e figura 6.1) e *Lingo* (figura 5.6), a qual pode ser vista no quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Comparação de resultados *Set 0_T* – *Excel versus Lingo*

Solução	<i>Excel</i>	<i>Lingo</i>
WBGT (°C)	18	18.04511
Custo global (u.m.)	0.52	0.5254720
Custo energia (u.m.)	0.52	0.5200584
Custo produtividade (u.m.)	0.00	0.005413534

Uma primeira nota acerca da aparente discrepância de resultados. As expressões utilizadas no programa *Lingo* correspondem à transposição das indicadas no quadro 4.4 (síntese do *Set 0_T*), cujos coeficientes se encontram arredondadas ou truncados. Essa situação não ocorre nos cálculos efetuados na folha de cálculo *Excel*, porquanto os valores transitam de

¹⁹⁴ Segmento de reta horizontal, que separa ‘*teórico*’ de ‘*aplicado*’.

umas fórmulas para as dependentes através do registo real de cada célula, guardado em memória. Este facto está na origem e justifica a diferença de valores verificada entre os dois processos de cálculo. No entanto, nota-se que as diferenças registadas possuem uma ordem de grandeza de centésimas, ou mesmo milésimas (consoante os casos), disparidades que não têm significância no âmbito da análise que se pretende efetuar. Portanto, a validade da argumentação subsequente não é posta em causa pela aproximação de que os valores apresentados no quadro 6.2 correspondem à mesma realidade, isto é, a solução encontrada coincide e corresponde a um índice de stresse térmico WBGT = 18°C e a um custo global de 0.52 u.m., para ambos os casos.

Numa comparação análoga, tomando por base os resultados obtidos para as variantes A, B e AB (ver quadros 5.4 a 5.6) e os correspondentes *outputs* produzidos no *Lingo* para as mesmas situações - que se apresentam no anexo 5.5 - obtém-se os dados que se sintetizam no quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Comparação de resultados Set 0_T (variantes A e B) – *Excel versus Lingo*

Solução	<i>Excel</i>		<i>Lingo</i>	
	WBGT (°C)	Custo global (u.m.)	WBGT (°C)	Custo global (u.m.)
Variante A5	18	2.61	18.04511	2.605706
Variante A10	33	4.00	32.90598	3.991993
Variante B	18	0.52	18.04511	0.5254720
Variante A5B	25	2.32	25.00000	2.322672
Variante A10B	25	3.71	25.0000	3.712843

Para as cinco variantes testadas verifica-se, novamente e como seria de esperar, que os resultados coincidem para os dois programas em comparação, aparte as discrepâncias decimais de segunda e terceira ordem, já explicitadas e fundamentadas.

Esta situação mostra que a aplicação de qualquer um dos programas é adequada e assertiva para a produção do resultado geral, constatando-se que ambos conduzem a soluções ótimas idênticas, no tratamento de idênticos problemas. Nessa perspetiva, a escolha de um ou outro, é indiferente.

Porém, a utilização do *software Lingo* no processo de otimização faculta um conjunto de informação adicional, de extrema utilidade para a análise de outras envolventes do problema, em especial a sua sensibilidade a variações paramétricas (coeficientes das variáveis) ou de quantidade de recursos disponíveis (RHS). A análise seguinte centra-se nos resultados obtidos com a utilização do referido programa.

Para o efeito, considerem-se os pressupostos e critério de escolha da solução a avaliar, infraindicados:

- A estrutura e tipo de informação obtida na resolução de distintos problemas (ex.: listagens ‘*Solution Report*’ e ‘*Range Report*’) é independente dos mesmos. Nessa ótica, qualquer das soluções individuais apresentadas no anexo 5.5 pode ser

utilizada como fonte de informação para a análise a efetuar, sem perda de generalidade.

Portanto, para o desenvolvimento posterior, a escolha recaiu na solução produzida para o *Set 0_T*, por se tratar do modelo ‘raiz’, sem variantes, cujos resultados foram também descritos ao longo do corpo principal do texto (ver ponto 5.4) e, complementarmente, inseridos no anexo 5.5;

bem como as subsequentes definições de conceitos específicos, em complemento às explicações sobre os grupos de conteúdos das listagens, de carácter geral, produzidos no ponto 5.4, a saber:

- Solução ótima do problema – conjunto de valores das variáveis que, cumprindo todas as restrições impostas, conduzem ao melhor valor da função objetivo (no caso presente, mínimo custo);
- Solução impossível – quando não existe um conjunto de valores para as variáveis que cumpra, simultaneamente, a globalidade das restrições. Usualmente, esta situação ocorre devido a uma incorreta formalização do problema. Por exemplo, estabelecendo-se duas restrições mutuamente exclusivas, $x \leq 20$ e $x \geq 50$, não existe possibilidade, no espaço físico/real, da variável x satisfazer ambas as restrições, tornando a resolução do problema impossível;
- Restrições – expressões que delimitam o espaço de soluções admissíveis para o problema. São, normalmente, do tipo¹⁹⁵:

$$\alpha x + \beta y \leq K$$

(Eq. 6.1)

em que:

x, y - variáveis;

α e β - coeficientes (tecnológicos);

K - valor independente (recursos disponíveis) (RHS);

- Restrições ativas – designam as relações que efetivamente limitam o valor da solução do problema, ou seja, para as quais os ‘recursos’ (RHS) que lhes estão associados são integralmente consumidos, a que corresponde uma variável ‘folga’ de valor nulo.
- Restrições inativas – relações que, sendo cumpridas, possuem uma *folga* positiva.
- Restrições redundantes – condições que por serem menos restritivas do que outras, que integram a mesma formalização, são sempre cumpridas. Como exemplo, veja-se que das duas restrições $x \leq 100$ e $x \leq 30$, a primeira é redundante, pois o valor máximo de x será 30 (2ª restrição), sempre inferior a 100, em todo o domínio admissível;

Recorrendo à leitura dos dados das figuras 5.4 e 5.6, vejam-se, então, os valores relativos à solução para o problema selecionado, o que nos permite materializar os conceitos anteriores e comentar os resultados.

¹⁹⁵ Exemplo para duas variáveis. Equações (=) ou inequações (\leq ou \geq).

Primeiramente, para melhor visualização dos resultados obtidos e percepção dos comentários a estabelecer, será conveniente utilizar valores reais, em substituição dos valores aproximados apresentados nos *outputs* das figuras 5.6 (*Solution Report*) e 5.7 (*Range Report*). As respectivas conversões encontram-se expressas no quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Conversão de valores aproximados da figura 5.6 nos seus correspondentes valores reais

Variável / Expressão	Lingo	
	Valor Listado	Valor real a considerar
C_e	0.5200584	0.52
C_p , $CTFT_{dr}$, TFT_{dr}	0.5413534E-2	0
I	15.94586	16
WBGT	18.04511	18
V_{PASSAD}	1.695489	1.70
Slack (linha 1)	0.5254720	0.52
Slack (linha 17)	0.5413534E-01	0
Slack (linha 18)	0.4511278E-01	0
Slack (linha 19)	14.95489	15

Idênticas considerações e conversões se aplicam aos valores listados na figura 5.7 (*Range Report*). Assim, tomando como base os valores resultantes do ajustamento referido, segue-se a análise (de sensibilidade), item a item, da informação registada, iniciando-se pela figura 5.6 (*Solution Report*).

Uma primeira referência ao processo de pesquisa da solução ótima utilizado pelo programa *Lingo*. Este usa um método iterativo (*Simplex*, integrado na área de investigação operacional) de duas fases, designadamente:

- Fase 1 - Pesquisa de uma solução inicial admissível, de partida;
- Fase 2 – A partir da solução obtida na fase 1, percorre os pontos extremos adjacentes à solução corrente que conduzam a uma melhoria do valor da função objetivo, até atingir a solução ótima. A cada iteração corresponde um novo ponto adjacente, ou seja, uma nova solução intermédia, melhor que a anterior.

Na solução em análise, o número de iterações efetuadas até se atingir a solução ótima final foi de 14, a que corresponde um valor da função objetivo de 0.52 u.m., para um índice $WBGT = 18^{\circ}C$ ¹⁹⁶.

Uma segunda referência para os valores indicados na coluna '*slack or surplus*' correspondentes aos valores das variáveis '*folga*'. Neste caso, considerando que a numeração das linhas (coluna *row*) corresponde à indicada na figura 5.4, podem tecer-se os seguintes comentários:

¹⁹⁶ Note-se que são aqui indicados apenas os valores das variáveis de entrada (WBGT) e de saída (custo total), na linha da estrutura (*input/output*) apresentada na figura 5.1. Porém, os valores das restantes variáveis da solução podem ser lidos na coluna '*Value*' da figura 5.6.

- *Row 1* – corresponde à função objetivo, para a qual os conceitos de *restrição* ou *folga* não fazem sentido. O valor indicado corresponde ao valor da função objetivo;
- *Row 2 a 16, 20 e 21* – correspondem a equações para as quais a *folga* é, obrigatoriamente, igual a zero (0). Repare-se que, tecnicamente, a *folga* é a medida da diferença entre a disponibilidade existente de um recurso (2º membro, *RHS*) e o efetivo consumo desse mesmo recurso, representado pela adição das parcelas do 1º membro. Obviamente, essa diferença poderá ser não nula apenas em restrições estipuladas por inequações.

As equações podem considerar-se, de acordo com as definições prévias, como restrições ativas. No entanto a sua análise é destituída de interesse, por se tratar de restrições ‘permanentemente ativas’, para qualquer solução admissível;

- *Row 22 a 24* – Estas três inequações referem-se aos limites que não podem ser excedidos por variáveis (*t*, *TCI*) a medir no decurso dos ensaios a realizar na câmara climática, pelo que apenas têm interesse e aplicabilidade nesse contexto, analogamente às restrições das linhas 20 (*t*) e 21 (*V_ergómetro*). Registe-se, como curiosidade decorrente do processo iterativo de cálculo, que os valores das variáveis, apontados pela simulação, representam as situações mais exigentes para o ser humano (*TCI* = 39°C, *V_ergómetro* = 1.7 m/s), no cumprimento integral da duração prevista do ensaio laboratorial (*t* = 2h). Ainda sobre as inequações em causa, salienta-se que as linhas 22 e 24 são ativas (*folga* = 0), enquanto a 23 é inativa (*folga* = 2). O conjunto de variáveis referido foi desde já incluído no modelo, a título meramente indicativo, como complemento e numa perspetiva de desenvolvimento futuro.
- *Row 17* – Relativa ao limite máximo imposto à intensidade de corrente no circuito elétrico (*I* = 16 A). A *folga* desta restrição é nula, constituindo-se como ativa.
- *Row 18 e 19* – Relativas aos limites inferior (18°C) e superior (33°C) de WBGT. O valor deste índice na solução é 18°C (coluna ‘*Value*’), a que corresponde uma *folga* = 0, na linha 18 (restrição ativa) e uma *folga* = 15, na linha 19 (restrição inativa).

Da exposição anterior, considerando apenas as restrições de maior relevância para a corrente análise, pode referir-se que as restrições $I \leq 16$ (*Row 17*) e $WBGT \geq 18$ (*Row 18*) são as que efetivamente limitam o valor da solução do problema, porquanto atingem os seus correspondentes valores limite, conforme se demonstrou pela análise dos valores das variáveis *folga*.

Para se finalizar a análise da informação da figura 5.6, resta comentar a ‘coluna’ de ‘*Reduced Cost*’¹⁹⁷. Verifica-se que, para a solução em análise, os valores que a integram são todos nulos, pelo que se trata de um ‘mau exemplo’, enquanto fornecedor de dados para análise desse fator.

Entende-se ser útil detalhar este aspeto, pelo que se optou por utilizar resultados oriundos de outra solução (anexo 5.5), onde existam valores diferentes de zero na referida coluna, com o intuito de generalizar a presente exposição.

¹⁹⁷ A coluna ‘*Dual Price*’ não se aplica, no presente contexto, conforme explicado no ponto 5.4.

Tomemos, então, como fonte de informação, as listagens de resultados apresentados no anexo 5.5, donde se extraíram os valores sintetizados no quadro 6.5, relativos à solução obtida para a variante A10B (WBGT = 25°C), que reúne as características pretendidas.

Quadro 6.5 – Excertos de dados relativos à solução da variante A10B

Solução	WBGT	Value		Reduced Cost	
		TFT _{tci}	TFT _{wbgt}	TFT _{tci}	TFT _{wbgt}
A10B	25	0.925001	0.0	0.0	0.1412345

Neste caso, o valor do ‘*Reduced Cost*’ associado à variável TFT_{wbgt} é 0.1412345 ($\neq 0$). O seu significado pode ser entendido como “a penalização no valor da função objetivo, pela introdução da variável em causa¹⁹⁸ na solução do problema”.

Numa abordagem simplificada, este conceito é concretizado para o problema em estudo, em termos práticos, do seguinte modo:

- A solução do problema é condicionada pelos fatores ‘temperatura corporal interna’ (TFT_{tci}) ou ‘temperatura de referência WBGT’ (TFT_{wbgt}), em alternativa e mutuamente exclusivos;
- O valor de TFT_{tci} é 0.925001, enquanto o de TFT_{wbgt} é 0.0, o que significa que na presente solução é preponderante a componente ‘TCI’, sendo esta a que integra e condiciona a solução. Esta situação é também confirmada pelo ‘*reduced cost*’ que lhe está associado ser nulo: se a variável TFT_{tci} já integra a solução, não existe qualquer penalização para a sua introdução na ‘base’¹⁹⁹;
- A variável TFT_{wbgt} não integra a solução (variável não básica, *Value* = 0). Se pretendermos ‘forçar’ a sua entrada como elemento condicionante da solução do problema, o valor da função objetivo sofre um impacto negativo correspondente ao valor *reduced cost* indicado para a variável.

Da explicação anterior transparece a importância do *reduced cost*, enquanto fator ou instrumento de apoio à gestão (informação para tomada de decisão). Para o exemplo, veja-se que se adotássemos a temperatura de referência WBGT como limite, seríamos conduzidos a uma solução de custo superior. O valor desse acréscimo (medido via *reduced cost*) pode ser comparado, por exemplo, com os investimentos necessários para aquisição dos equipamentos de monitorização da temperatura interna (ex.: sensores ingeríveis, recetores), dando suporte a decisões, focadas na minimização de custos, que permitam identificar qual das duas opções seguintes será mais vantajosa:

- Opção 1: Possibilitar a preponderância do fator TCI para o estabelecimento de limites, investindo nos meios necessários à sua monitorização contínua - solução operacional ótima, com investimento inicial;

¹⁹⁸ Por cada unidade da variável.

¹⁹⁹ Designação técnica para o conjunto de variáveis que integram a solução. As variáveis não básicas têm valor obrigatoriamente nulo.

- Opção 2: Utilizar, como limites, os valores de temperatura de referência WBGT expressos na norma ISO 7243:1989 – solução operacional mais onerosa, sem investimento inicial.

Em síntese, os *reduced cost* fornecem informação sobre os custos de introdução de alternativas na solução atual, o que se considera ser de especial utilidade na construção e análise de cenários para o funcionamento das empresas.

Como nota final sobre este aspeto, relembra-se que na solução inicialmente considerada (*Set 0_T*), os valores da coluna *Reduced Cost* são nulos para todas as variáveis. Esta situação reflete apenas a singularidade de que todas as variáveis não básicas podem ser incluídas na base a ‘custo zero’, isto é, existe equilíbrio nas contribuições de cada alternativa para o valor da função objetivo. Todas as opções têm igual impacto na solução.

Finalizada a análise dos conteúdos do *output ‘Solution Report’*, observem-se os dados expressos no relatório ‘*Range Report*’ (figura 5.7) relativos à mesma solução de partida (*Set 0_T*). Aí distinguem-se dois grupos de dados, a saber:

- ‘*Objective Coefficient Ranges*’ (OCR) – refere os intervalos de variação dos coeficientes da função objetivo (FO) que não alteram a solução ótima inicial.
- ‘*Righthand Side Ranges*’ (RHS) – refere os intervalos de variação dos termos independentes (RHS, isto é, o 2º membro das restrições quando expressas na forma da equação 6.1) que não alteram a solução ótima inicial.

Quanto ao primeiro grupo, apenas faz sentido analisar as variações de coeficientes associadas às variáveis C_e , C_s e C_p , que integram a FO (ver linha 1 da figura 5.4). Paralelamente, para a variável C_s não existem valores expressos no OCR, o que se poderá justificar por esta variável possuir um valor constante, igual a zero, na formalização corrente, pelo que alterações no seu coeficiente têm um impacto nulo na FO. Assim, as considerações seguintes, neste plano, incidem sobre as duas variáveis restantes - C_e e C_p .

Tomando como exemplo um espaço bidimensional, comece-se por observar que a consequência da variação dos coeficientes da FO se traduz na alteração de declive da reta respetiva, conforme se mostra analiticamente nos passos seguintes.

Seja:

$$k_1 C_e + k_2 C_p = \text{constante} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

a equação geral da reta representativa da função objetivo, em que k_1 e k_2 são os coeficientes das variáveis custo, respetivamente, C_e e C_p . A mesma equação, na forma explícita, representa-se por:

$$C_p = -\frac{k_1}{k_2} C_e + \text{constante}' \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Designando por m o declive da reta, neste caso ele é dado por:

$$m = -\frac{k_1}{k_2}$$

(Eq. 6.4)

ou seja, determinado com base no rácio dos coeficientes das variáveis custo, como se pretendia mostrar. A partir deste reconhecimento, veja-se a figura 6.10, onde se esquematiza a solução resultante do processo de otimização para um problema de mínimo, a qual servirá de instrumento auxiliar à exposição subsequente.

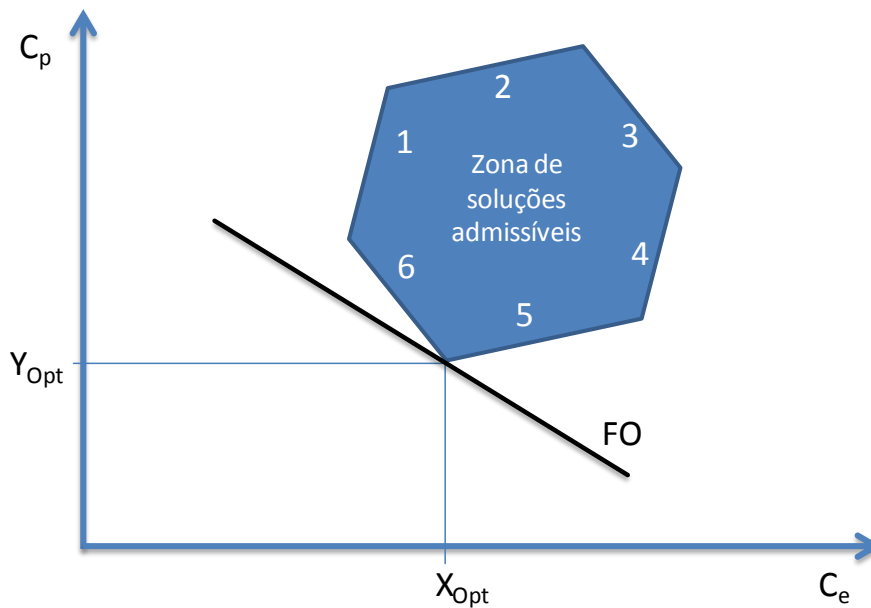


Figura 6.10 – Solução ótima de um problema de minimização

A solução ótima (mínimo custo) ocorre quando a FO intersecta a zona de soluções admissíveis²⁰⁰ no ponto extremo ‘mais próximo da origem do sistema de eixos cartesianos’, o qual tem como coordenadas o par ordenado (x_{opt}, y_{opt}) . Para o problema concreto, em análise, esta solução inicial corresponde aos valores dos coeficientes $(k_1, k_2) \rightarrow (1, 1)$ ²⁰¹. Veja-se, seguidamente, a interpretação dos valores indicados nas colunas ‘allowable increase’ e ‘allowable decrease’ (fig. 5.7), os quais se replicam no quadro 6.6.

Quadro 6.6 – Variação de coeficientes da função objetivo (fig. 5.7)

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
C _E	1.0	2.830555	Infinity
C _P	1.0	Infinity	0.7389412

Comece-se por analisar o que acontece ao declive da FO, por aplicação da equação 6.4, quando os aumentos/diminuições admissíveis apresentam o valor ‘infinito’:

²⁰⁰ Delimitada pelo conjunto de restrições (numeradas de 1 a 6, no exemplo) do problema.

²⁰¹ Conforme listado, por exemplo, na coluna ‘current coefficient’ da figura 5.7, para as variáveis C_e e C_p.

- Se o decréscimo permitido para o coeficiente k_1 de C_e não está limitado (∞), então k_1 tende para zero, devido às condições de não negatividade e, consequentemente, o declive m também ($m = 0$);
- Analogamente, se o acréscimo permitido para o coeficiente k_2 de C_p não está limitado (∞), então k_2 tende para ∞ e, consequentemente, o declive m tende para zero ($m = 0$);

A representação gráfica dessas alterações de declive da FO ($m = 0$) coincide, sendo esquematizada na figura 6.11.

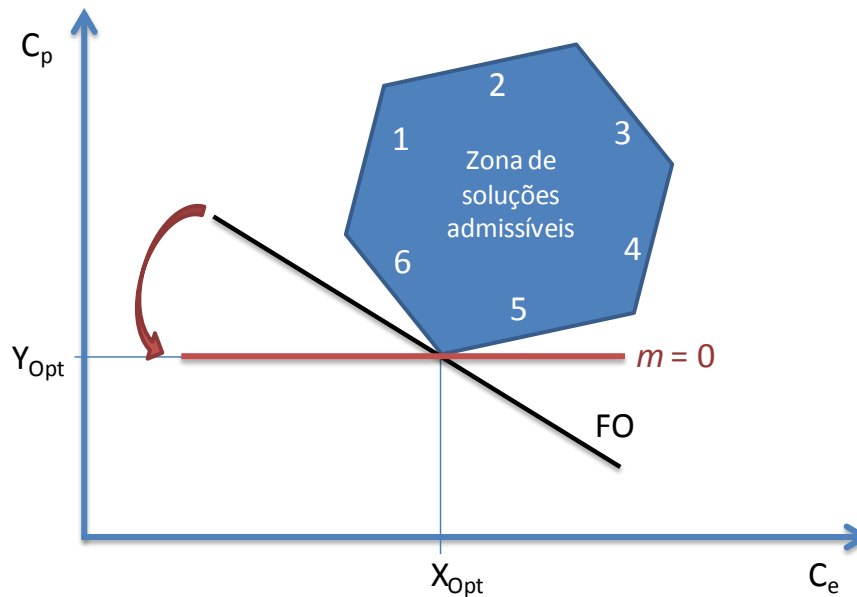


Figura 6.11 – Solução para declive da FO nulo ($m = 0$)

onde se mostra a rotação da reta FO, em torno do ponto ótimo, para se atingir um declive nulo (reta horizontal).

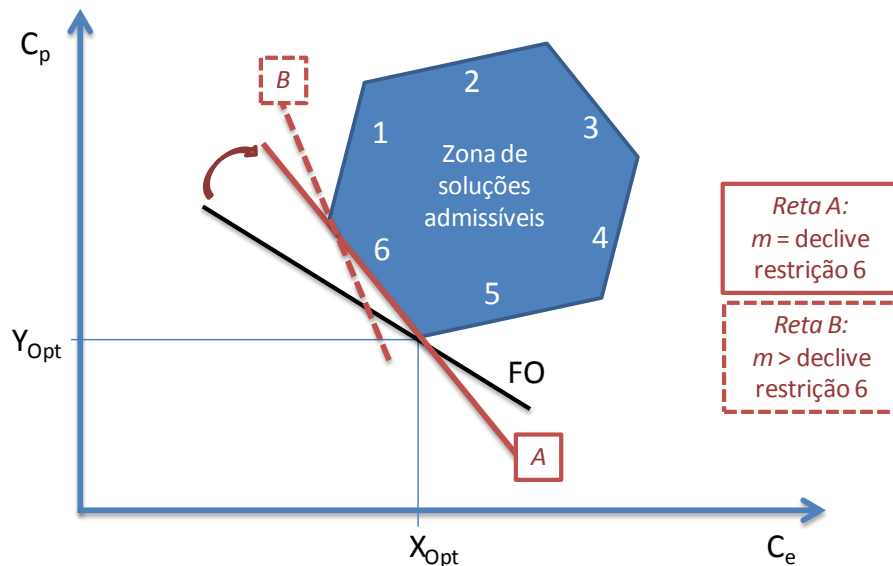
Observemos agora os restantes valores indicados no quadro 6.6 e vejamos os seus impactes no declive da função. Para o coeficiente k_1 é indicado um acréscimo admissível de aproximadamente 2.83, enquanto para o coeficiente k_2 o decréscimo permitido corresponde a 0.74 (aprox.). Por aplicação da equação 6.4 verifica-se que ocorre, para ambos os casos, o aumento do declive da FO, visto que:

- k_1 (numerador da fração): Se k_1 cresce $\Rightarrow m$ cresce;
- k_2 (denominador da fração): Se k_2 decresce $\Rightarrow m$ cresce;

Considerando que a evolução do declive é no mesmo sentido, em qualquer dos casos, veja-se o significado do termo ‘admissível’, socorrendo-nos da representação gráfica da figura 6.12 para visualização da situação.

Por definição, o intervalo de variação admissível para os valores dos coeficientes é aquele que garante a manutenção da mesma solução ótima do problema, ou seja, a representada pelas coordenadas (x_{opt}, y_{opt}) . Nessa perspetiva, observando a figura 6.12, constata-se que, para que a solução se mantenha, o declive da FO pode aumentar até igualar o valor da

inclinação da restrição 6, o que se assinala pela reta A. Analiticamente, tomando como exemplo a variável C_e e de acordo com os dados, essa situação ocorre quando $k_1 = \text{valor inicial} + \text{acréscimo admissível}$, isto é, $k_1 = 1 + 2.83 = 3.83$. Caso o declive exceda este valor a solução é alterada e irá ocorrer noutro ponto extremo (interseção das restrições 1 e 6), assinalado na figura pela reta B, a tracejado.



Fica então ‘justificado’ o significado dos acréscimos ou decréscimos admissíveis listados que, em resumo, se traduzem nos valores em que se pode aumentar/diminuir os coeficientes da FO, de modo a que o seu declive se encontre no intervalo dos declives das restrições ativas²⁰², garantindo a manutenção da solução ótima inicial²⁰³.

Numa ótica prática, o conhecimento destas variações admissíveis fornece informação de grande utilidade para a decisão de manter ou alterar as condições de operação da empresa. Para ilustrar esta ideia, imagine-se a seguinte aplicação, baseada no exemplo descrito e relativa aos custos de energia elétrica (C_e). Este custo é determinado pelo produto entre o custo unitário de energia e o consumo realizado, pelo que podemos associar o coeficiente k_1 ao preço unitário de energia a pagar ao fornecedor (€/kWh). Esse coeficiente repercute uma variável de mercado, cujo valor não é controlado internamente pelas empresas. Considere-se que o referido custo inicial é de 1 euro/kWh (exemplo) e que existe uma tendência persistente de alta de preços no mercado.

- Quais as opções que se colocam à empresa, neste quadro?

²⁰² No exemplo, as restrições número 5 e 6.

²⁰³ No exemplo dado, devido às restrições de não negatividade, um dos extremos foi limitado a $m=0$, não se atingindo a inclinação da restrição 5, o que configura um ‘caso particular’. Em geral, os limites estão associados às inclinações das restrições ativas, como referido.

Tendo presente que a empresa tem como objetivo otimizar os custos, a fundamentação da resposta para esta questão pode ser alicerçada na informação disponibilizada na coluna ‘allowable increase’, como segue (baseada nos dados do exemplo):

- Se o preço unitário de energia for inferior a 3.83 €/kWh (valor máximo do coeficiente k_1 , de acordo com o acréscimo admissível), a empresa não deve alterar as condições de operação (ex.: WBGT), visto que a solução ótima corrente não sofre alteração;
- Ao invés, se o preço unitário de energia exceder o referido valor (> 3.83 €/kWh), deverá ser identificada qual a nova solução ótima para o problema (ex.: novo valor WBGT alvo) e adotar as medidas necessárias para a atingir.

Deste simples exemplo sobressai a importância da informação relativa aos limites de variação para os coeficientes da FO, enquanto dados de suporte para a escolha da melhor opção de reação da empresa, quando sujeita a condicionalismos externos, como sejam as alterações de preços de energia no mercado. Este é, sem dúvida, um instrumento de grande utilidade, no contexto empresarial.

Para finalizar a análise do ‘Range Report’ (fig. 5.7) para o problema exemplo, resta explicitar os conteúdos do designado grupo ‘Righthand Side Range’. Sobre este aspeto, os comentários serão focados apenas nas restrições relativas à intensidade de corrente (I) (row 17) e valor do índice de stresse térmico (WBGT) (row 18 e 19), as quais servem de base exemplificativa, sem perda de generalidade. Para este propósito, sintetizam-se os respetivos dados ‘fonte’, no quadro 6.7²⁰⁴.

Quadro 6.7 – Excerto de dados RHS (fig. 5.7)

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
17	16	Infinity	0
18	18	0	Infinity
19	33	Infinity	15

Recapitulando algumas definições úteis para a descrição seguinte, saliente-se que o conceito subjacente ao valor de RHS²⁰⁵, numa perspetiva industrial, é ‘a quantidade do recurso disponível, na empresa, que pode ser usado na produção’²⁰⁶, donde decorre o conceito de restrição ativa e inativa. Se numa restrição da solução:

- O valor do 1º membro iguala o valor do 2º membro (RHS), a folga é nula, isto é, o recurso é integralmente consumido e a restrição designa-se ativa;

²⁰⁴ Já com conversão de valores aproximados.

²⁰⁵ Definido com a restrição escrita na forma apresentada na equação 6.1.

²⁰⁶ Pode tratar-se do número de horas de mão-de-obra ou de utilização de máquinas, disponibilidades departamentais, matéria-prima, energia, etc.

- O valor do 1º membro é inferior²⁰⁷ ao valor do 2º membro (RHS), então a folga é positiva, ou seja, o recurso não foi integralmente consumido e a restrição designa-se inativa.

A aplicação destes conceitos às restrições correspondentes às linhas indicadas no quadro 6.7 resulta na consideração das restrições 17 e 18 como ativas e a 19 como inativa (ver valores e folgas na fig. 5.6).

Por outro lado, há que relembrar que os valores indicados nas colunas de acréscimos/decréscimos admissíveis para o valor *RHS*, por definição, não alteram a solução ótima do problema, analogamente ao indicado para a variação dos coeficientes da FO.

Da conjugação das duas considerações anteriores, segue-se a interpretação dos dados apresentados nas referidas colunas, executada separadamente para cada tipo de restrição:

- Restrições ativas (*row* 17 e 18) – começando por ver a restrição 17 (fig. 5.4), relativa à intensidade de corrente elétrica (*I*), verifica-se que a limitação imposta é a de que o valor da variável não pode exceder 16 amperes ($I \leq 16$). Para essa restrição é indicado o valor ‘infinity’ como ‘allowable increase’ no *RHS*. Veja-se que se aumentarmos, progressivamente, o valor de *RHS* (17, 18, ..., ∞), a restrição continua a ser cumprida, cada vez com maior folga. Se a variável ‘*I*’ é menor do que 16, obviamente será sempre menor que 17, 18 e assim sucessivamente. Portanto, podemos aumentar o *RHS* indefinidamente, o que não altera a solução e, portanto, justifica o valor ‘infinity’ apresentado para esse acréscimo. Quanto ao outro limite de variação de *RHS* para a mesma restrição - ‘allowable decrease’ - o valor apresentado nessa coluna é igual a ‘zero’. Neste caso, por se tratar de uma restrição ativa ($I_{\text{ótimo}} = 16$ A), qualquer redução no valor de *RHS* ‘obriga’ a que o valor da variável *I* também decresça, ficando limitado ao novo valor disponível do recurso, o que configura uma alteração da solução ótima. Portanto, para se manter a solução, o decréscimo permitido para o valor do recurso disponível (*RHS*) é nulo, o que é consistente com o valor apresentado no *output*.

Para a restrição 18 ($WBGT \geq 18$), os mesmos valores (‘infinity’, 0) trocam a posição nas colunas, em relação ao indicado para a restrição 17. Por se tratar de uma restrição ativa do tipo ‘maior ou igual’ (\geq), a situação é simétrica da anterior, ou seja, se *WBGT* é maior do que 18, também será maior do que qualquer novo valor de *RHS* que lhe seja inferior (17, 16, ...), o que justifica o valor ‘infinity’ na coluna ‘allowable decrease’.

Observando o outro extremo do intervalo, verifica-se que a variação permitida é 0 (zero). Note-se que se aumentássemos o *RHS* (19, 20, ...) então o valor da variável *WBGT* teria de igualar o novo valor de *RHS* para cumprir a restrição, o que representaria uma nova solução, diferente da de partida, situação que não pode ocorrer, por definição de ‘allowable increase’. Na essência, a gênese das limitações colocadas para cada uma das restrições ativas, sendo simétricas, configuram uma mesma realidade;

²⁰⁷ Numa restrição de ‘menor ou igual’ (\leq).

- Restrição inativa (*row* 19) – Estudo análogo ao efetuado para as restrições ativas é aplicado para esta classe de restrições (inativas). Tomando como exemplo a restrição $WBGT \leq 33$ (*row* 19), constata-se que o incremento máximo definido para o valor de *RHS* é infinito, o que se pode explicar de modo similar ao descrito no ponto antecedente: se o $WBGT_{ótimo}$ é menor do que 33°C (atual *RHS*), também o será para valores de *RHS* superiores ($> 33^{\circ}\text{C}$) - situação menos restritiva - sem alterar o valor da solução ($WBGT_{ótimo}$).

Quanto ao ‘*allowable decrease*’, o valor indicado nessa coluna é 15. Para interpretar este limite, veja-se que o mesmo é igual ao valor da folga da restrição em causa (‘*slack or surplus*’ da *row* 19, fig. 5.6), ou seja, a redução do valor de *RHS* nessa cifra transforma a restrição inativa em ativa, passando a integrar o grupo de restrições que ‘efetivamente’ limitam a solução do problema. Portanto, a solução não é alterada enquanto a restrição mantiver o seu ‘estado’ (inativa), o que ocorre, neste caso, se o decréscimo de *RHS* for menor²⁰⁸ do que 15, valor indicado na coluna ‘*allowable decrease*’.

Para finalizar a discussão sobre as alterações de *RHS*, numa perspectiva de aplicação e interesse prático, considere-se a seguinte premissa:

- A solução ótima de um qualquer problema reflete a melhor alocação dos recursos disponíveis, esgotando alguns (restrições ativas) e consumindo apenas parcialmente outros (restrições inativas), tendo em vista a obtenção do melhor valor possível para a função objetivo definida, no caso, focada na ‘*minimização de custos*’.

O resultado encontrado reflete a ‘fotografia’ do ponto de funcionamento da empresa, no seu atual contexto. Porém, numa visão estratégica, com incidência nos custos globais da empresa, será interessante pesquisar a resposta para a seguinte questão:

- Tomando como ponto de partida a situação atual, será possível reduzir os custos globais da empresa?

Decorrente da informação disponibilizada pela análise de sensibilidade efetuada, a resposta à questão é afirmativa, podendo ser executada por duas vias de atuação, a saber:

- Numa primeira atuação, podemos alienar os recursos não utilizados, ou seja, a quantidade representada pelo valor da folga existente nas restrições inativas, a qual coincide com o valor expresso na coluna ‘*allowable decrease*’. Repare-se que existe um custo associado à ‘posse’ de um recurso, pelo que só fará sentido económico deter ou adquirir a quantidade exata que utilizamos. A existência de quantidades superiores representa um acréscimo de custos global, um desperdício do ponto de vista económico. Nesta opção de atuação, a solução ótima mantém-se inalterada. Portanto, a análise da localização e dimensão das folgas, fornece-nos os dados que nos permitem identificar, onde e como atuar, para otimizar a quantidade de recursos a disponibilizar;
- Outra possibilidade de redução de custos será incidir a atuação nas restrições ativas. Adotando a restrição 17, como exemplo dessa categoria, o decréscimo do seu valor

²⁰⁸ No limite, igual.

RHS foi anteriormente indicado como zero, para se garantir a manutenção da solução atual.

No entanto, podemos diminuir o custo desta componente se reduzirmos *RHS* em valores maiores do que zero, o que terá como consequência o deslocamento para um outro ponto ótimo de funcionamento, o que configura uma nova solução, distinta da inicial. Nesta abordagem, os custos da empresa diminuem, numa lógica de ‘*downsizing*’ de atividade da empresa²⁰⁹, pelo que esta estratégia terá um contexto de aplicação muito mais limitado do que a anterior.

Finalizada a descrição antecedente, dá-se por concluída a explicitação e discussão da informação referenciada nos relatórios de saída, produzidos pelo *software Lingo*.

Para terminar a exposição do presente capítulo de discussão de resultados, segue-se uma nota final acerca da utilização de dois programas distintos (*Excel* e *Lingo*) na aplicação ao tratamento do problema formulado, o que possibilitou uma análise de maior profundidade e abrangência, em complementaridade. Através de programação na folha de cálculo *Excel*, foi executado o ‘varrimento’ dos valores da variável de entrada (WBGT) para o seu intervalo de variação admissível, de que resultou a produção de resultados e gráficos facilitadores da perceção das soluções encontradas, para cada variante. Paralelamente, por aplicação do *software Lingo*, obtiveram-se as soluções ótimas para as mesmas variantes do problema, através de um processo iterativo de otimização, que produziu, como resultado, um conjunto de informação analítica fundamental para a posterior análise de sensibilidade à solução do problema.

O primeiro ‘instrumento’ possibilitou uma visualização gráfica, reveladora da evolução dinâmica geral da situação (*o filme*), enquanto o segundo é focado numa abordagem analítica profunda da solução (*a fotografia*), características complementares que justificaram as suas aplicações conjuntas. Adicionalmente, a obtenção de soluções coincidentes para ambas as aplicações, reforça a consistência do modelo e a coerência da informação apresentada.

²⁰⁹ No limite, os custos serão nulos se a atividade da empresa for extinta.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS/CONCLUSÕES

A problemática geral abordada no presente trabalho circunscreve-se à análise das condições de ambiente térmico - de características quentes e húmidos - e suas repercussões no ser humano, nos planos de produtividade e segurança ocupacionais. Para o tratamento do problema foram definidas hipóteses de trabalho a validar (ponto 1.4), objetivos a atingir (ponto 3.1) e estipuladas as respetivas metodologias a utilizar (ponto 3.2).

Os conteúdos de cada um destes pontos podem sintetizar-se em:

- Hipóteses de trabalho – existência de relações ‘causa/efeito’ entre as variáveis que caracterizam as grandezas de interesse (ex.: ambiente térmico, segurança, produtividade);
- Objetivo global – desenhar um modelo quantitativo, assente nas relações funcionais entre as grandezas em estudo, que constitua um instrumento a utilizar na pesquisa da melhor solução para as ‘condições de funcionamento’ das empresas, numa perspetiva de otimização de custos;
- Metodologias – numa primeira fase, pesquisa bibliográfica para identificação do ‘estado de arte’ relativo aos temas em análise, o qual serviu de base ao posterior desenvolvimento do modelo que constitui o objetivo central do trabalho. Numa fase posterior, concretizar a construção do modelo, através das etapas sequenciais: 1) definição individualizada das funções parcelares que quantificam a relação entre cada par de variáveis (plano físico); 2) conversão dos resultados das relações funcionais definidas nos seus correspondentes valores em unidades monetárias (plano económico) e, por fim, 3) agregar as funções num modelo final, global.

Ainda acerca destes três aspetos, referem-se algumas considerações finais, que se passam a expor:

- Qualitativamente, as hipóteses de trabalho foram validadas, com base nos resultados da pesquisa bibliográfica realizada. São profusamente referidos e reconhecidos - nos trabalhos publicados sobre o tema - os efeitos, por exemplo, do ambiente térmico nos níveis de segurança ou de produtividade laboral, o que se constatou ser matéria consensual. Porém, identificou-se um défice de trabalhos que quantifiquem analiticamente o tipo de relações em causa, situação para a qual o modelo desenvolvido e proposto vem dar um contributo positivo na resposta a essa lacuna;
- A concretização do objetivo global foi realizada com sucesso, por aplicação das metodologias apontadas, porquanto se obteve um ‘produto’ final que integra e quantifica a informação relevante, no contexto considerado. O modelo resultante foi sujeito a testes de desempenho e sensibilidade, revelando-se adequado para os tipos de aplicações e finalidades preconizadas.

Paralelamente, são de salientar outras considerações, centradas na génese do modelo estabelecido e no interesse da sua aplicação, de entre as quais se destacam:

- A conceção do modelo, assente na explicitação individual de cada uma das relações que o integram, é uma estratégia que apresenta múltiplas vantagens. Desde logo, permite a identificação e análise isolada de cada componente (função parcelar), o que facilita a compreensão e eventual ‘depuração’²¹⁰ do modelo, na sua fase de *investigação e desenvolvimento (I&D)*. Complementarmente, essa estrutura potencia a capacidade e facilidade de adaptação do modelo a novas realidades e contextos, dotando-o de uma versatilidade ímpar, quando comparado com as restantes propostas alternativas disponíveis. Sobre o interesse prático desta característica, refira-se que os modelos de produtividade oriundos de estudos publicados - de que são exemplo as propostas de Koehn e Brown (1985), Mohamed e Srinavin (2002) ou Zhao, Zhu e Lu (2009) - foram alvo de uma avaliação comparativa, no decurso do presente estudo. Dessas apreciações - descritas nos pontos 4.11.2 e 6.2 - resultou a rejeição de aplicação de todos deles, por razões diversas, constatando-se ser inviável proceder a ajustamentos paramétricos ou modificações estruturais nos modelos originais, por estes possuírem formulações fechadas, do tipo ‘caixa negra’, sobre as quais se conhece apenas a expressão final global. Ao invés, no modelo proposto, esse tipo de alterações são facilitadas pela sua estrutura desagregada, constituída por parcelas independentes, de relações duais, o que reforça a ideia inicial sobre a vantagem desta conceção;
- Outra característica ‘genética’ fundamental do modelo é a sua ‘linguagem’ económica, isto é, a produção de resultados traduzidos numa métrica monetária. Este elemento foi determinante para a utilização de instrumentos focados na otimização de custos, bem como na realização de análises ‘custo/benefício’. Adicionalmente, a utilização de unidades monetárias é entendida como ‘uma mais-valia’ nos processos de comunicação, divulgação e compreensão dos resultados produzidos pelo modelo, abrangendo todos os ‘públicos’ envolvidos, quaisquer que sejam as suas áreas de intervenção ou formação;
- Complementarmente, são ainda de evidenciar outras características essenciais associadas ao modelo, como sejam o seu carácter inovador, integrador e evolutivo, que se consideram importantes no âmbito do presente estudo e/ou para a sua aplicação generalizada, no futuro, a contextos experimentais ou reais distintos. Descodificando o que está subjacente a cada ‘rótulo’, assinala-se que a abordagem implementada na estruturação do modelo é, tanto quanto se conhece, inédita, não se tendo encontrado, na pesquisa bibliográfica realizada, a descrição de algum outro modelo com características similares.
Nesse sentido, trata-se de uma proposta claramente inovadora, aliás, em várias vertentes: numa primeira, pela forma de estabelecimento de funções relacionais entre variáveis, baseada num único elemento de ligação entre elas, no caso o índice de stresse térmico WBGT; depois, pela inclusão do fator ‘consumo de energia elétrica’ dos sistemas de renovação de ar, em interligação com as condições de ambiente térmico e, por fim, a transformação das relações físicas identificadas nos seus respetivos impactes económicos.

²¹⁰ ‘Debug’, em linguagem de programação.

Quanto ao elemento ‘integrador’, ele pode ser analisado segundo dois ângulos: um primeiro, centrado na consideração de que a generalidade dos fatores e variáveis que intervêm ou influenciam as grandezas foram contemplados no modelo, o que lhe confere o pretendido potencial de tratamento holístico do problema; um segundo, focado na operacionalidade do modelo, integrando e relacionando um conjunto de fatores independentes tão dispares, como sejam, os relacionados com o ambiente térmico, a energia, a segurança ou a produtividade (plano global) e os que incidem nas perdas de produtividade associadas a diferentes limites (temperatura corporal interna, temperatura de referência WBGT) ou originadas por diferentes causas (paragens de trabalho ou diminuição do ritmo de trabalho) (plano específico), para se citarem apenas alguns exemplos. Esta característica integradora assegura que o modelo aglutina e relaciona os aspetos mais relevantes para o tratamento do tema.

Sobre o último aspeto referido – o evolutivo - esse é um elemento essencial na aplicação futura do modelo, a novas realidades e em termos práticos. A sua evolução é alicerçada na facilidade de adaptação a novos contextos, o que foi desde logo realçado na descrição apresentada num dos pontos anteriores do presente capítulo.

Após as considerações finais supra-mencionadas, apresenta-se seguidamente as principais conclusões extraídas do trabalho desenvolvido, nomeadamente:

- Da pesquisa bibliográfica realizada sobre a interação “ambiente térmico – segurança – produtividade”, decorre a constatação de que os resultados dos trabalhos desenvolvidos sobre o tema são, em geral, de natureza qualitativa. Os resultados desses estudos - úteis numa perspetiva de perceção fenomenológica e de tendências na relação causa/efeito entre variáveis - não permitem medir a dimensão das consequências produzidas, o que limita as suas aplicações práticas. Supletivamente, a generalização dos poucos dados quantificados disponíveis é prejudicada, face à utilização de critérios e métricas de avaliação não uniformes, entre os diversos estudos publicados. Existe, portanto, um défice de investigação dirigida à quantificação deste tipo de relações globais;
- Os ‘modelos de produtividade’ disponíveis, dirigidos à quantificação da relação “ambiente térmico – produtividade”, foram analisados e testados, revelando-se desadequados para aplicação generalizada, devido às limitações impostas aos seus domínios de aplicação (ex.: proposta de Zhao, Zhu e Lu (2009)) ou à dificuldade de adaptação a novas aplicações, distintas das que estiveram na origem dos seus desenvolvimentos (ex.: modelo de Koehn e Brown (1985)). Também sobre este aspeto se conclui pela necessidade de aprofundar a investigação no desenvolvimento de novos instrumentos, para aplicação mais abrangente e global;
- O modelo desenvolvido e proposto no presente trabalho é um contributo orientado para a supressão das lacunas evidenciadas nos dois pontos antecedentes, nomeadamente, pela quantificação das relações funcionais em jogo e pela introdução de uma nova abordagem na definição das expressões que relacionam as grandezas, o que foi atingido com sucesso;

- Os resultados alcançados nos testes efetuados ao modelo (pesquisa de soluções ótimas, evolução dinâmica de soluções, análise de sensibilidade), através do estudo do seu comportamento e resposta à gama admissível de valores das variáveis de entrada, permite concluir pela adequação da sua estrutura e funcionamento, enquanto instrumento orientado para a determinação de soluções ótimas, de custo mínimo, para os problemas tipificados. A obtenção de soluções idênticas, por duas *vias* alternativas e independentes (programas *Excel* e *Lingo*), reforça a coerência e consistência da estrutura do modelo;
- Limitações de ordem temporal e técnico-administrativas condicionaram a recolha de dados em contextos experimentais e reais. Porém, esses condicionalismos não afetam, de forma direta, os resultados obtidos. Veja-se que o modelo foi desenvolvido na perspetiva de o dotar de grande versatilidade na adaptação a novas realidades, conforme acima se mencionou. Adicionalmente, da necessidade de introduzir, caso a caso, as condições iniciais inerentes a cada situação particular a analisar, pode inferir-se não ser possível definir uma parametrização e condições iniciais fixas, para aplicações transversais generalizadas. Esta é, aliás, uma das principais razões pela fraca resposta ou incapacidade de adaptação dos modelos existentes, quando aplicados a contextos distintos dos que estiveram na origem dos seus respetivos desenvolvimentos, ao proporem, para esses efeitos, uma formalização ‘fechada’, única. Assim, torna-se evidente que a validação do modelo através de dados experimentais e/ou reais, apenas legitima a sua aplicação para essas circunstâncias particulares. Nesta ótica, a estratégia de validação seguida no presente estudo incidiu fundamentalmente sobre a estrutura e comportamento geral do modelo, para a qual os dados utilizados se revelaram adequados e suficientes, tornando desnecessários e acessórios os demais (experimentais e reais) na prossecução desse objetivo.

Finalmente, como *terminus* da presente exposição sobre o estudo elaborado, sugerem-se algumas linhas de investigação e aplicações práticas subsequentes, que se consideram complementares e desejáveis para a evolução e progresso nesta área de conhecimento, em concreto:

- O aprofundamento de investigação dirigida à quantificação das relações funcionais entre ambiente térmico, segurança e produtividade, com recurso a metodologias, critérios e unidades uniformizadas, que promovam a comparabilidade de estudos e resultados;
- O desenvolvimento de novos estudos que incidam sobre a influência da variável ‘humidade’ nas referidas relações. Sobre este aspeto, num plano qualitativo, é consensual a consideração de que esta variável possui uma importante influência nos níveis de produtividade e segurança ocupacionais, em atividade realizadas no tipo de ambientes térmicos considerado (quentes). Porém, vários dos estudos

quantitativos disponíveis e analisados não contabilizam esse fator²¹¹, situação que se afigura necessitar de clarificação através de estudos complementares.

- Aplicar o modelo proposto a dados experimentais, obtidos através de ensaios em laboratório, bem como a dados reais, recolhidos durante a realização de atividades em minas subterrâneas, com a maior abrangência possível, após promover a sua necessária adaptação a cada contexto.

Veja-se que as especificidades de um problema particular, como amplamente se salientou, são necessariamente incluídas na sua formulação, num processo de adaptação permanente. Porém, numa lógica iterativa, a incorporação de atualizações paramétricas/funcionais decorrentes das diversas aplicações tenderá a estabilizar um núcleo de funções, que convergem e se tornam invariantes para aplicações futuras. Este é, desde logo, um elemento que sustenta esta proposta de aplicação extensiva, que se considera imprescindível para o processo de evolução dinâmica do modelo, rumo a uma maior robustez deste instrumento.

Por último, é de salientar que a sugestão de aplicação futura e generalizada do modelo está em consonância com um dos objetivos fundamentais, implícito, que se consubstancia na ‘*utilidade*’ do trabalho produzido. A utilização do modelo no contexto empresarial, espaço privilegiado para a sua aplicação é, não só desejável, como reflete o sentido de todo o esforço empreendido.

²¹¹ Vejam-se, a título de exemplo, os estudos de Witterseh *et al.* (2004); Seppänen, Fisk e Faulkner (2005); Eston (2005) ou Wyon (2010), cujos resultados foram agrupados na figura 2.6.

8. BIBLIOGRAFIA

- Águas, Miguel. 2001. "Conforto térmico." IST, Univ. Téc. Lisboa. http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/PDF/EMEE_1.pdf (acedido em 22 de fevereiro de 2010).
- Aljuhani, M. 2002. "Labour's utilization and labour's productivity of a gold mine in Saudi Arabia." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 102, n.º 5: 307-309.
- Allnutt, J. 2008. "Ventilation design for Xstrata Copper's Ernest Henry underground project prefeasibility study." *AUSIMM New Leaders' Conference*. 37-43.
- Alonso, J., A. Ferre, A. Ortega, e J. Hermosilla. 2011. "Approach to the evaluation of the thermal work environment in the greenhouse-construction industry of SE Spain." <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000709>.
- Axelsson, O. 1974. "Influence of heat exposure on productivity." *Work Environ Health*, n.º 11: 94-99.
- Baker, A., K. Heiler, e S. Ferguson. 2003. "The impact of roster changes on absenteeism and incident frequency in an australian coal mine." *Occupational and Environmental Medicine* 60, n.º 1: 43-49.
- Balbus, J., e C. Malina. 2009. "Identifying vulnerable subpopulations for climate change health effects in the United States." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 51, n.º 1: 33-37.
- Bandopadhyay, Sukumar, Hanguang Wu, M. Nelson, e V. Izaxon. 1995. "Design of ventilation systems for underground placer mines in the arctic: analysis of the mine thermal regime ." *Proceedings of the US Mine Ventilation Symposium*. 27-32.
- Bandyopadhyay, L., e S. Sinha. 2002. "Development of an expert system for on-line ventilation network analysis and graphic representation of mine ventilation parameters." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 102, n.º 3: 125-130 .
- Barr, D., W. Gregson, e T. Reilly. 2010. "The thermal ergonomics of firefighting reviewed." *Applied Ergonomics* 41, n.º 1: 161-172.
- Barton, SS. 2002. "Aspects of the effect of substance use on health, wellness and safety of employees and families in northern remote work sites." *Social Indicators Research* 60, n.º 1-3: 263.
- Bates, G. S.D. "Empirical validation of a new heat stress index." <http://pointhealth.com.au/pdf/TWL%20Vaildation%20Heat%20stress%20study.pdf> (acedido em 28 de 12 de 2010).
- Bates, G. 2005. "Minimising the effects of environment on health and productivity." *9th AusIMM Underground Operators Conference*. 381-384.
- Bernard, Thomas. 1999. "Evaporative resistance and sustainable work under heat stress conditions for two cloth anticontamination ensembles." *Compendex*.
- Bhattacharjee, A., N. Mukherjee, e A. Ghosh. 1997. "A system dynamics model for safety hazard control in mines." *ICS-MRI '97: Proceedings Of The 27th International Conference of Safety in Mines Research Institutes - Select Papers*. 41-48.

- Biffi, M., e D. Stanton. 2011. "Meeting the reduced availability and rising costs of electrical power: Anglo Platinum ventilation and cooling strategies." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 111, n.º 2: 109-116.
- Bingham, Michael. 2009. "Heat stress assessment and control." *Occupational Health & Safety* 78, n.º 5: 58-59 .
- Blank, V., L. Laflamme, F. Diderichsen, e R. Andersson. 1998. "Choice of a denominator for occupational injury rates: A study of the development of a Swedish iron-ore mine." *Journal of Safety Research*. 263-273.
- Bobko, N., e V. Chernyuk. 2008. "Effects of time-of-day, work strain, noise and air temperature on human-operator performance under time pressure." *International Journal of Psychophysiology* 69, n.º 3: 247-247.
- Bobrov, A., Y. Batmanov, S. Lunev, e A. Martynov. 1997. "Air temperature regulation in mine workings on the basis of local and block ventilation systems with boreholes ." *ICS-MRI '97: Proceedings of the 27th International Conference of Safety in Mines Research Institutes - Select Papers*. 109-114.
- Brake, R., e T. Nixon. 1998. "The design of ventilation and refrigeration systems and engineering controls for the enterprise mine." *AUSIMM'98: The Mining Cycle* 2: 187-197.
- Budd, Grahame. 2008. "Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations." *Journal of Science and Medicine in Sport* 11, 20-32.
- Burdon, C., H. O'Connor, J. Gifford, S. Shirreffs, P. Chapman, e N. Johnson. 2010. "Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions." *Journal of Sports Sciences* 28, n.º 11: 1147-1156.
- Bystron, H. 2010. "The influence of dry mine air chemical composition on the safety state of the ventilation system of a deep mine using underground main fan." *Archives of Mining Sciences* 55, n.º 3: 377-387 .
- Cadarette, B., S. Montain, M. Kolka, L. Stroschein, W. Matthew, e M. Sawka. 1999. "Cross validation of USARIEM heat strain prediction models." *Aviation Space and Environmental Medicine* 70, n.º 10: 996-1006.
- Callejon-Ferre, A., F. Manzano-Agugliaro, M. Diaz-Perez, e J. Carreno-Sanchez. 2011. "Improving the climate safety of workers in Almeria-type greenhouses in Spain by predicting the periods when they are most likely to suffer thermal stress." *Applied Ergonomics* 42, n.º 2: 391-396.
- Callow, D. 2006. "The impact of mining conditions on mechanized mining efficiency." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106, n.º 12: 821-830.
- "Capturing value from simulation." 2005. *Academic Search Complete*.
- Carter, Russell A. 2009. "Spreading the safety net." *Engineering & Mining Journal* 210, n.º 4: 44-46.
- Carter, Russell A. 2010a. "Fleet dispatch systems accelerate mine productivity." *Engineering & Mining Journal* 211, n.º 1: 30-32.
- Carter, Russell A. 2010b. "Truck wheels: Mine productivity rides on the rim." *Engineering & Mining Journal* 211, n.º 7: 70-75.

- Carter, Russell. 2011. "Conveyor technology on track for higher performance." *Engineering & Mining Journal* 212, n.º 5: 68-73.
- Cavender, B. 2003. "Burying the dinosaurs: Achieving breakthrough safety performance without a safety department." *Mining Engineering* 55, n.º 2: 38-42.
- Chamaret, A., M. O'Connor, e G. Recoche. 2007. "Top-down/bottom-up approach for developing sustainable development indicators for mining: application to the Arlit uranium mines (Niger)." *International Journal of Sustainable Development*. 161-74.
- Chan, A.P.C., W. Yi, D.P. Wong, M.C.H. Yam, e D.W.M. Chan. 2012. "Determining an optimal recovery time for construction rebar workers after working to exhaustion in a hot and humid environment." *Building and Environment* 58: 163-171.
- Chan, L. S. Apple. 2008. "Prediction of thermal confort." <http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/newpage315.htm> (acedido em 18 de novembro de 2010).
- Chen, A., Chang, V.W.-C. 2012. "Human health and thermal comfort of office workers in Singapore." *Building and Environment* 58: 172-178.
- Chen, H., Q. Feng, R. Long, e H. Qi. 2013. "Focusing on coal miners' occupational disease issues: A comparative analysis between China and the United States." *Safety Science* 51, n.º 1: 217-222.
- Chen, Xishan. 2003. "Research of the application of ventilation-based temperature dropping system for hot humid underground mines." *Compendex*.
- Cheng, W., S. Zhang, P. Yang, e G. Yanpei. 2007. "Grey prediction of the trend of serious coal mining accident in Shandong Province ." *Mine Hazards Prevention and Control Technology*. 411-415.
- Chiavenato, Idalberto. 2006. Administração - Teoria, Processo e Prática. 4ªEd. Elsevier.
- Choi, J.-H., e V. Loftness. 2012. "Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations." *Building and Environment* 58: 258-269.
- Clapp, A., P. Bishop, J. Smith, e T. Bauman. 2000. "Palatability ratings of different beverages of heat exposed workers in a simulated hot industrial environment." *International Journal of Industrial Ergonomics* 26, n.º 1: 57-66.
- Cohen, J. 1988. "Heading off heat stress [utility personnel safety]." *EPRI Journal (USA)* 13, n.º 5: 22-27.
- Coleman, Patrick, e John Kerkerling. 2007. "Measuring mining safety with injury statistics: Lost workdays as indicators of risk." *Journal of Safety Research* 38, n.º 5: 523-533,.
- Constable, S.H. 1994. "Intermittent microclimate cooling during rest increases work capacity and reduces heat stress." *Compendex*.
- Costa, E., J. Baptista, e M. Diogo. 2011. "Adaptação climática, metabolismo e produtividade." *CLME*. Maputo. 3710A.
- Costa, E., J. Baptista, e M. Diogo. 2012. "Thermal Environment and Productivity in Sedentary Activities. A Short Review." *SHO2012*. Guimarães. 366-368.
- Costa, E., J. Baptista, M. Diogo, e A. Magalhães. 2011. "Hot thermal environment and its impact in productivity and accidents." Montagem por A. S. Miguel, G. Perestrelo, N. Costa, M.

- Barroso, P. Arezes, P. Carneiro, P. Cordeiro, Rui Melo J. S. Baptista. *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene - SHO2011*. Guimarães. 211-215.
- Crawford, J., R. Graveling, H. Cowie, e K. Dixon. 2010. "The health safety and health promotion needs of older workers." *Occupational Medicine-Oxford* 60, n.º 3: 184-192.
- CSIRO. 2009. "Mine safety system goes global." *Engineering & Mining Journal*.
- Cui, Y., J. You, e F. Luo. 2010. "Architecture for knowledge-based quality management system designed to improve the mine safety in China." *International Conference on Management Science and Engineering (Mse 2010)*. 136-139.
- Culp, K., S. Tonelli, S. Ramey, K. Donham, e L. Fuortes. 2011. "Preventing heat-related illness among hispanic farmworkers." *AAOHN Journal* 59, n.º 1: 23-32.
- Dalgic, A., e A. Karakus. 2004. "A computerised study on the natural ventilation characteristics of the Guleman Kef chromium mine." *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology* 113, n.º 3: 153-162.
- Danko, G., P. Mousset-Jones, e M. McPherson. 1988. "Sensitivity analysis on selected input parameters for mine climate simulation programs." *Society of Mining Engineers of AIME, Preprint*.
- Dash, S., e T. Kjellstrom. 2011. "Workplace heat stress in the context of rising temperature in India." *Current Science* 101, n.º 4: 496-503.
- DeVaul, Randy. 2008. "At home, work, or play, it's hot." *Occupational Health & Safety* 77, n.º 3: 30-32.
- Dirner, V., E. Kulova, e A. Dobes. 2010. "Impact of mining on the environment." *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production - Swemp*. 90-106.
- Donoghue, A. 2004. "Heat illness in the US mining industry." *American Journal of Industrial Medicine* 45, n.º 4: 351-356.
- Donoghue, A. M. 2005. "Heat illness in mining." *8th International Mine Ventilation Congress*. Brisbane, Australia, 95-102.
- Donoghue, A., e G. Bates. 2000a. "The risk of heat exhaustion at a deep underground metalliferous mine in relation to body-mass index and predicted Vo(2)max." *Occupational Medicine-Oxford* 50, n.º 4: 259-263.
- Donoghue, A., e G. Bates. 2000b. "The risk of heat exhaustion at a deep underground metalliferous mine in relation to surface temperatures." *Occupational Medicine-Oxford* 50, n.º 5: 334-336.
- Donoghue, A., M. Sinclair, e G. Bates. 2000. "Heat exhaustion in a deep underground metalliferous mine." *Occupational and Environmental Medicine* 57, n.º 3: 165-174.
- Dragosavuevic, Z., M. Ivkovic, e J. Miljanovic. 2010. "Applied research impact of underground coal mining systems on injuring of miners in the under ground mines Serbia." *Tehnika* 65, n.º 6: 8-12.
- Drenda, J. 2008. "Improvement of microclimatic conditions in deep mines as a way of managing the increasing thermal hazard." *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management* 24, n.º 1: 215-220 Part 2 .

- Du Plessis, J., D. Scott, e H. Moorcroft. 2005. "Modern cooling strategies for ultra-deep hydropower mines." *8th International Mine Ventilation Congress - Proceedings*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. 29-34.
- Duarte, L. Miguel. S.D.. "A atividade mineira em Portugal durante a Idade Média." *Universidade do Porto*. <http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/2022.pdf> (acedido em 12 de outubro de 2010).
- Dubinski, J. 2000. "Management of safety and its impact on mine productivity in Polish coal mines ." *Mining in the New Millennium Challenges and Opportunities*. 71-78.
- Dumka, Mike. 1989. "Specific Cooling Power - a Representative Heat Stress Index for Genmin Mines." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 42, n.º 5: 88-92.
- Edwards, M., e J. Sproull. 1984. "Creativity - Productivity Gold Mine." *Journal of Creative Behavior* 18, n.º 3: 175-184.
- Elevli, S. 2010. "Performance measurement of mining equipments by utilizing OEE." *Web of Science*.
- Esterhuizen, G.S., e R.G. Görtunca. 2006. "Coal mine safety achievements in the USA and the contribution of NIOSH research." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 106, n.º 12: 813-820.
- Eston, S. 2005. "Problemas de conforto termo-corporal em minas subterrâneas." *Revista de Higiene Ocupacional* 4, n.º 13: 15-17.
- Eston, S., W. Iramina, W. Hennies, e R. Nakamura. 2000. "Environmental problems at the underground limestone Baltar mine, Sao Paulo, Brazil." *Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production*. 197-200 .
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fanger, P. O. 1972. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Feng, Q., e H. Chen. 2013. "The safety-level gap between China and the US in view of the interaction between coal production and safety management." *Safety Science* 54: 80-86.
- Feng, Xiwen. 2002. "The application of ergonomics on mining safety management." *Process in Safety Science and Technology* 3, n.º Part A: 793-796.
- Fiedler, F., C. Bell, M. Chemers, e D. Patrick. 1984. "Increasing mine productivity and safety through management training and organization development - A comparative study." *Basic and Applied Social Psychology* 5, n.º 1: 1-18.
- Fiscor, Steve. 2008. "Xstrata Copper launches Kidd Creek expansion project." *Engineering & Mining Journal*. 50-56.
- Fiscor, Steve. 2010a. "Major open-pit copper mines move underground." *Engineering & Mining Journal*. 80.
- Fiscor, Steve. 2010b. "Copper Prices Keep Climbing." *Engineering & Mining Journal*. 72.
- Fiscor, Steve. 2011. "Copper and Iron Ore Prices Reach New Highs." *Engineering & Mining Journal*. 120.
- Flores, R. 1998. "Coalbed methane: From hazard to resource." *Current Contents*.

- Fogarty, A., et al. 2004. "Cardiovascular and thermal consequences of protective clothing: A comparison of clothed and unclothed states." *Ergonomics* 47, n.º 10: 1073-1086.
- Fogleman, M., L. Fakhrzadeh, e T. Bernard. 2005. "The relationship between outdoor thermal conditions and acute injury in an aluminum smelter." *International Journal of Industrial Ergonomics* 35, n.º 1: 47-55 .
- Gagge, A.P., A.P. Fobelets, e L.G. Berglund. 1986. "Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment." *ASHRAE Transactions* 92, n.º pt 2B: 709-731 .
- Gancev, Boris. 2006. "Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea ." http://www.poli.usp.br/d/pme2599/2006/Artigos/Art_TCC_006_2006.pdf. (acedido em 22 de novembro de 2010).
- García-Herrero, S., M.A. Mariscal, J. García-Rodríguez, e D.O Ritzel. 2012. "Working conditions, psychological/physical symptoms and occupational accidents. Bayesian network models." *Safety Science* 50, n.º 9: 1760-1774.
- Gertner, A. 1984. "Effects of work and motivation on the heart rates of chronic heat-exposed workers during their regular work shifts." *Compendex*.
- Gomes, J., O. Lloyd, e N. Norman. 2002. "The health of the workers in a rapidly developing country: Effects of occupational exposure to noise and heat." *Occupational Medicine-Oxford* 52, n.º 3: 121-128.
- González, P.L. et al. 2001. "Modeling of a main ventilation system in the planning and exploitation of underground mines." *Compendex*. <http://xml.engineeringvillage2.org/controller/servlet/Controller?SEARCHID=c8c7d612dd72f56e8M27e2prod1data2&CID=expertSearchAbstractFormat&DOCINDEX=7&database=131075&format=expertSearchAbstractFormat>.
- Grayson, R. 2001. "Safety vs. productivity and other factors in US underground coal mines." *Mining Engineering* 53, n.º 8: 41-44.
- Grenier, M., e S. Hardcastle. 1990. "Safety and health in the canadian mine environment - An overview of ventilation, dust, radiation and diesel emission research." *CIM Bulletin* 83, n.º 944: 41-46.
- Guedes, J. C., J. Baptista, e M. T. Diogo. 2011. "Factores condicionantes da tolerância ao calor." Montagem por A. S. Miguel, G. Perestrelo, N. Costa, M. Barroso, P. Arezes, P. Carneiro, P. Cordeiro, Rui Melo J. S. Baptista. *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene - SHO2011*. Guimarães. 300-304.
- Guedes, J., e J. Baptista. 2011. "Riscos associados à prática de esforço em condições de calor extremas." Montagem por RM, Tavares, JMRS, Alexandre, JL, Ferreira, AJM, Vaz, MAP Natal Jorge. *CIBEM* 10.
- Hadenius, Patric. 2006. "Underground wi-fi." *Technology Review* 109, n.º 1: 28-28.
- Hall, Dan. 2010. "Talk up productivity." *BRW* 32, n.º 12: 10.
- Hancock, P., e I. Vasmatazidis. 1998. "Human occupational and performance limits under stress: The thermal environment as a prototypical example." *Ergonomics* 41, n.º 8: 1169-1191.
- Hanna, E., T. Kjellstrom, C. Bennett, e K. Dear. 2011. "Climate change and rising heat: population health implications for working people in Australia." *Asia-Pacific Journal of Public Health* 23, n.º 2: 14S-26S, Suppl. S.

- Hardcastle, S., C. Kocsis, Y. Bissiri, e G. Baiden. 2005. "Optimising mine ventilation through the use of life-cycle production models." *8th International Mine Ventilation Congress – Proceedings*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. 373-381.
- Hardman, D. 1996. "Coal-mining productivity in South Africa compared with Australia and the USA." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 96, n.º 7: 297-301.
- Hardy, R. J. 2006. "Ventilation simulation programs MineVent and MFIRE: Updates to advance the technology of simulation programming." *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*. 477-482.
- Hassi, J., L. Gardner, S. Hendricks, e J. Bell. 2000. "Occupational Injuries in the Mining Industry and their Association with Statewide Cold Ambient Temperatures in the USA." *American Journal of Industrial Medicine* 38, n.º 1: 49-58.
- "Heat stress." 2005. *Professional Safety* 50, n.º 4: 41-47.
- Hedges, M. "Australian innovations in mining." *First International Future Mining Conference and Exhibition 2008, Proceedings*. 2008. 131-133.
- Hendryx, Michael, e Melissa M. Ahern. 2009. "Mortality in Appalachian coal mining regions: The value of statistical life lost." *Public Health Reports* 124, n.º 4: 541-550.
- Hermanus, May. 2002. "Mine occupational hygiene." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 55, n.º 2: 40-44 .
- Hole, J., e M. Pande. 2009. "Worker productivity, occupational health, safety and environmental issues in thermal power plant." *Proceedings of the 2009 IEEE IEEM*.
- Holmer, I. 1996. "Assessment and prevention of heat stress at work." UFA Bulletin No. 4, National Institute of Working Life, Stockholm, Sweden.
- Holmer, I. 2009. "Evaluation of Cold Workplaces: An Overview of Standards for Assessment of Cold Stress." *Industrial Health* 47, n.º 3: 228-234.
- Homce, G., e J. Cawley. 2011. "Understanding and quantifying arc flash hazards in the mining industry." *IEEE Transactions on Industry Applications* 47, n.º 6: 2437-2444.
- Hoonakker, P., T. Loushine, P. Carayon, J. Kallman, A. Kapp, e M. Smith. 2005. "The effect of safety initiatives on safety performance: A longitudinal study." *Applied Ergonomics* 36, n.º 4: 461-469.
- Höppe, P. R. 1993. "Heat balance modeling." Institute and Outpatient Clinic for Occupational Medicine, University of Munich. <http://www.springerlink.com/content/I54304v3r2163803/fulltext.pdf> (acedido em 5 de fevereiro de 2011).
- Houtven, G. Van, W.R. Reed, E.A. Biddle, J.C. Volkwein, L. Clayton, e E. Finkelstein. 2010. "Rates and costs of respiratory illness in coal mining: A cross-industry comparative analysis." *Journal of Occupational & Environmental Medicine* 52, n.º 6: 10-617.
- Howes, M. 1983. "Application of refrigeration in mines." *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology* 92: 69-79.
- Howes, M. 2005. "Ventilation and cooling design for long declines." *Eighth International Mine Ventilation Congress*. 19-27.
- Iliáš, L., I. Andraş, I. Cioară, e F. Nicolae. 2009. "The evaluation of technological mining systems based on the operational indicators." *BULETINUL, Universităţii Petrol LXI*, n.º 1: 35-38.

- Ismail, A., M. Yusof, N. Makhtar, B. Deros, e M. Rani. 2010. "Optimization of temperature level to enhance worker performance in automotive." *American Journal of Applied Sciences* 7, n.º 3: 360-365.
- Jara, J., P. Pérez, e P. Villalobos. 2010. "Good deposits are not enough: Mining labor productivity analysis in the copper industry in Chile and Peru 1992-2009 Resources Policy, 35: (4) p. 247-256." *Resources Policy*. 247-256.
- Jay, O., e G. Kenny. 2010. "Heat exposure in the canadian workplace." *American Journal of Industrial Medicine* 53, n.º 8: 842-853.
- Jia, Yueqian. 1984. "Current status of mine safety techniques and a new approach toward ensuring safety in production." *Coal Science and Technology*, n.º 10: 9-12.
- Jiang, Hong-Tao, Yi-Wei Shi, Zhaohui Wang, e Yao-Cai Wang. 1996. "Application of distributed fiber optic sensing in mine for methane detection." *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 90-93.
- Jielin, L., Z. Keping, D. Hongwei, e Y. Chenglin. 2007. "Numerical Evaluation of Thermal Environment in Deep High Temperature Mine." *Progress In Mining Science and Safety Technology*. 1705-1709.
- Jones, M. 2003. "Thermal properties of stratified rocks from witwatersrand gold mining areas." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 103, n.º 3: 173-185.
- Joubert, D., J. Thomsen, e O. Harrison. 2011. "Safety in the heat: A comprehensive program for prevention of heat illness among workers in Abu Dhabi, United Arab Emirates." *American Journal of Public Health* 101, n.º 3: 395-398.
- Kalkowsky, B., e B. Kampmann. 2006. "Physiological strain of miners at hot working places in German coal mines." *Industrial Health* 44: 465-473.
- Kampmann, B., e C. Piekarski. 2005. "Assessment of the risks of heat disorders encountered during work in hot conditions in German hard coal mines." *Environmental Ergonomics* 3: 79-84.
- Kampmann, Bernhard, e Georg Bresser. 1999. "Heat stress and flame protective clothing in mine rescue brigadesmen: Inter- and intraindividual variation of strain." *Annals of Occupational Hygiene* 43, n.º 5: 357-365.
- Kecojevic, V., e L. Grayson. 2008. "An analysis of the coal mining industry in the United States." *Minerals & Energy*. 74-83.
- Kecojevic, V., e Z.M. Nor. 2009. "Hazard identification for equipment-related fatal incidents in the u.s. underground coal mining." *Journal of Coal Science and Engineering* 15, n.º 1: 1-6.
- Kenefick, R., e M. Sawka. 2007. "Hydration at the work site." *Journal of the American College of Nutrition* 26, n.º 5: 597S-603S Suppl. S.
- Kenny, Glen P. 2011. "Ice cooling vest on tolerance for exercise under uncompensable heat stress." *Journal of Occupational & Environmental Hygiene* 8, n.º 8: 484-491.
- Kenny, G., M. Vierula, J. Mate, F. Beaulieu, e S. Hardcastle. 2012. "A field evaluation of the physiological demands of miners in Canada's deep mechanized mines." *Journal of Occupational & Environmental Hygiene* 9, n.º 8: 491-501.

- Khokholov, Y., e A. Kurilko. 2005. "Mathematical simulation of thermal processes in underground workings of mines located in the cryolitic zone." *Eighth International Mine Ventilation Congress*. 467-470.
- Kielblock, A., e P. Schutte. 1998. "Emergency work in abnormally hot environments." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 51, n.º 4: 131-134.
- Kizil, M. 2007. "Virtual reality - A toy or a new way of training." *Science & Technology Proceedings*.
- Kjellstrom, T., e Haylee. 2009. "Climate change and health: impacts, vulnerability, adaptation and mitigation." National Centre for Epidemiology and Population Health, Australian National University, 20 (1-2): 6.
- Kjellstrom, T., I. Holmer, e B. Lemke. 2009. "Workplace heat stress, health and productivity - an increasing challenge for low and middle income countries during climate change." *Global Health Action*.
- Kock, Andre, Jan Oberholzer. 1997. "Development and application of electronic technology to increase health, safety, and productivity in the South African coal mining industry." *IEEE Transactions on Industry Applications* 33, n.º 1: 100-105.
- Koehn, Enno, e Gerald Brown. 1985. "Climatic effects on construction." *Journal of Construction Engineering and Management* 111, n.º 2: 129-137.
- Konarska, M., K. Soltyński, e A. Marszałek. 2000. "Problems in evaluation heat stress risk of women workers using the WBGT index." *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Association, 'Ergonomics for the New Millennium'*. 453-455.
- Krige, D., e C. Barnard. 1981. "Gold-mine productivity as affected by the average wet-bulb temperature of the underground working places." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 81, n.º 5: 117-121.
- Kukic, M., N. Ikanovic, e Dz. Kudumovic. 2009. "Injuries at work at coilliery "Underground exploitation" "Banovici" Coilliery inc Banovici." *HealthMed* 3, n.º 4: 529-537.
- Lakhani, Hyder. 1982. "Impact of technological change on labor productivity in U. S. coal mines - Evidence from time series and cross sectional data." *Energy (Oxford)* 7, n.º 9: 773-782.
- Lamberts, R., e A. Xavier. 2002. "Conforto térmico e stress térmico." <http://www.dec.ufms.br/lade/docs/cft/ap-labeee.pdf> 19/11 (acedido em 20 de novembro de 2010).
- Lambrechts, J. de V. 1972. "Critical comparison of specific cooling power and the wet kata thermometer in hot mining environments." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 73, n.º 5: 169-174 .
- Larsson, J., J. Appelgren, e J. Marshall. 2010. "Next generation system for unmanned LHD operation in underground mines." *SME Annual Meeting and Exhibit*. 1-6.
- Larsson, J., M. Broxvall, e A. Saffiotti. 2006. "A navigation system for automated loaders in underground mines." *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 129-140.
- Larsson, J., M. Broxvall, e A. Saffiotti. 2008. "Flexible infrastructure free navigation for vehicles in underground mines." *4th International IEEE Conference "Intelligent Systems" (IS)*. 45-50.

- Larsson, J., M. Broxvall, e A. Saffiotti. 2010. "An Evaluation of Local Autonomy Applied to Teleoperated Vehicles in Underground Mines." *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*. 1745-1752.
- Leeming, J., e T. Fifoot. 2001. "The management of heat and humidity in underground coal mines." *International Mining and Minerals* 3, n.º 42: 19-25.
- Leger, J. 1991. "Trends and causes of fatalities in South-African mines." *Safety Science* 14, n.º 3-4: 169-185.
- Leigh, J., G. Waehrer, T. Miller, e C. Keenan. 2004. "Costs of occupational injury and illness across industries." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 30, n.º 3: 199-205.
- Leigh, J., J. Griffiths, e C. Ellis. 1998. "Respiratory enthalpy changes in mine rescue workers exercising under heat stress." *Journal of Applied Physiology (USA)* 65, n.º 6: 2714-19.
- Li, Bingrui, Kenichi Uchino, e Masahiro Inoue. 2005. "Fundamental studies on locating spontaneous combustion of coal by the self-potential method." *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology* 114, n.º 1: A55-A63.
- Li, H., S. Wei, S. Tian, L. Wang, e H. Li. 2004. "Dynamic grey interrelation analysis on related factors of accidents due to human factor in coal mine." *Progress in Safety Science and Technology* 4, Pts A and B, n.º 4: 2673-2677.
- Li, X., X. Song, e X. Meng. 2009. "System dynamics simulation of coal mine accident system cause." *International Conference on Management Science & Engineering (16th)*. 2137-2142.
- Li, X., Y. Lu, J. Du, e Z. Liu. 2005. "The research of accident hidden troubles investigating and supervising method in coalmine." *Proceedings of the 12th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 1220-1223.
- Liang, C., G. Zheng, N. Zhu, Z. Tian, S. Lu, e Y. Chen. 2011. "A new environmental heat stress index for indoor hot and humid environments based on cox regression." *Building and Environment* 46, n.º 12 (): 2472-2479.
- Lipowczan, A. 1991. "Increasing the reliability and safety of mining machines by application of the vibration diagnostic." *International Conference on Reliability, Production, and Control in Coal Mines*. 155-163.
- Liu, H. 2010. "Prediction of thermal sensation in dynamic environment with TSSENS index." *Web of Science*.
- Liu, N., H. Wang, e Z. Yuan. 2010. "Study on the prevention of mine disaster based on self-organized criticality theory." *Progress in Safety Science and Technology* VIII, Pts A and B, n.º 8: 55-58.
- Liu, X., e Z. Zhang. 2011. "Study on relationship of miners' psychological characteristic and safety degree." *Achievements in Engineering Materials, Energy, Management and Control Based on Information Technology*, n.º Pts 1 and 2, 171-172: 295-298.
- Logsdon, Randy K. 2009. "Safety investments good as gold." *Rock Products* 112, n.º 9: 12.
- Long, T., K. Zhou, Q. Chen, e L. Zhao. 2008. "CFD ventilation simulation of deep mine with high temperature based on human thermal comfort." *3rd International Symposium on Modern Mining & Safety Technology Proceedings*. 476-480.
- Lopes, R., J. Baptista, e M. Diogo. 2008. "Conforto térmico e produtividade - Aplicação de modelos previsionais no setor da construção." *CLME. Moçambique*.

- Lowndes, I., S. Pickering, e C. Twort. 2004. "The application of energy analysis to the cooling of a deep UK colliery." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 104, n.º 7: 381-396.
- Maczkowiack, R., C. Smith, G. Slaughter, D. Mulligan, e D. Cameron. 2012. "Grazing as a post-mining land use: A conceptual model of the risk factors." *Agricultural Systems* 109: 76-89.
- Mader, T., e S. Davis. 2002. "Wind speed and solar radiation corrections for the temperature-humidity index." *15th Conference on Biometeorology and Aerobiology joint with the 16th International Congress on Biometeorology*. 154-157.
- Magalhães, S., R. Albuquerque, J. Pinto, e A. Moreira. 2002. "Termorregulação." http://fisiologia.med.up.pt/Textos_Apoio/outros/Termorreg.pdf (acedido em 15 de dezembro de 2012).
- Maher, Kris. 2011. "Data show safety levels improving at coal mines." *Wall Street Journal*. A5.
- Malchaire, J., e P. Mairiaux. 1991. "Strategy of analysis and interpretation of thermal working-conditions." *Annals of Occupational Hygiene* 35, n.º 3: 261-272.
- MaoYan, Liu Jiaping, e K. Hideki. 2007. "Prediction of thermal environment via revision of PMV index with body temperature." *Academic Journal of Xi'an Jiaotong University* 19, n.º 1: 60-2, 80.
- Markov, Detelin. S.D. "Standards in thermal comfort." <http://www.cfdc.tu-sofia.bg/publications/lec18Markov.pdf> (acedido em 24 de janeiro de 2011).
- Martinson, M. J. 1977. "Heat stress in Witwatersrand Gold Mines." *Journal of Occupational Accidents* 1, n.º 2: 171-193.
- Masuoka, T., Y. Takatsu, e I. Kohri. 2002. "Thermal sensation under unsteady thermal environments." *International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Paper no. 39630*. New Orleans, USA. 229-233.
- Mc Caffrey, C., O. Chevalerias, C. O'Mathuna, e K. Twomey. 2008. "Swallowable-capsule technology." *IEEE Pervasive Computing*. 23-29.
- MCA. 2008. "Australian mining needs 86,000 new staff to maintain market share." *TCE: The Chemical Engineer*. 11.
- McLean, R., K. Danert, S. Morrison, e G. Galbraith. 2007. "Hot occupational exposures: A corrected maximum exposure period to allow for sweating onset." *Building Services Engineering Research & Technology (UK)* 28, n.º 2: 183-8.
- McLellan, T., e G. Selkirk. 2006. "The management of heat stress for the firefighter: A review of work conducted on behalf of the Toronto Fire Service." *Industrial Health* 44, n.º 3: 414-426.
- Meyer, J., C. Martinet, L. Payot, G. Didry, e F. Horwat. 2001. "Evaluation of the Heat Strain by Heart Rate." *Travail Humain* 64, n.º 1: 29-44.
- Miao, D., W. Cheng, e X. Sui. 2007. "Study on Thermal Safety Design Index in High Temperature Coal Mine." *Mine Hazards Prevention and Control Technology*. 65-70.
- Miller, A., M. Habjan, e K. Park. 2007. "Real-time estimation of elemental carbon emitted from a diesel engine." *Environmental Science & Technology* 41, n.º 16: 5783-5788.
- Miller, V., e G. Bates. 2007. "The thermal work limit is a simple reliable heat index for the protection of workers in thermally stressful environments." *Annals of Occupational Hygiene* 51, n.º 6: 553-561.

- Miller, Veronica, Graham Bates, John Schneider, e Jens Thomsen. 2011. "Self-pacing as a protective mechanism against the effects of heat stress." *Annals of Occupational Hygiene* 55, n.º 5: 548-555.
- Misaqi, F., J. Inderberg, P. Blumenstein, e T. Naiman. 1976. "Heat stress in hot U. S. mines and criteria for standards for mining in hot environments." Informational Report, Issue 1048, Mining Enforcement and Safety Administration, Department of the Interior, United States.
- Mitchell, Duncan, e Austin Whillier. 1999. "Cooling power of underground environments." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 52, n.º 4: 161-168.
- Mohamed, Sherif, e Korb Srinavin. 2002. "Thermal environment effects on construction workers' productivity." *Work Study* 51, n.º 6: 297-302.
- Mohamed, Sherif e Korb Srinavin. 2005. "Forecasting labor productivity changes in construction using the PMV index." *International Journal of Industrial Ergonomics* 35: 345-351.
- "Monitoring of thermal stress in the South African mining industry." 2002. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 55, n.º 3: 85-87.
- Montain, S., M. Sawka, B. Cadarette, M. Quigley, e J. McKay. 1994. "Physiological tolerance to uncompensable heat-stress - Effects of exercise intensity, protective clothing, and climate." *Journal of Applied Physiology* 77, n.º 1: 216-222.
- Moran, D., e K. Pandolf. 1999. "Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) - To what extent is GT essential?" *Aviation Space and Environmental Medicine* 70, n.º 5: 480-484.
- Moraru, R., G.B. Babut, e M.C. Babut. 2010. "Management of heat stress in a hot, humid, underground environment specific to mine rescue activities in Valea Jiului coal basin." *University of Petrosani, Revista Minelor/Mining Revue* 2.
- Mozaffarieh, M., P. Gasio, A. Schötzau, S. Orgül, J. Flammer, e K. Kräuchi. 2010. "Thermal discomfort with cold extremities in relation to age, gender, and body mass index in a random sample of a Swiss urban population." *Population Health Metrics* 8, n.º 1: 17.
- Muir, I., P. Bishop, R. Lomax, e J. Green. 2001. "Prediction of rectal temperature from ear canal temperature." *Ergonomics* 44, n.º 11: 962-972.
- Murray-Smith, A.I. 1987. "Effect of clothing on heat stress in mining environments." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 40, n.º 3: 37-39.
- Nedza, Zbigniew. 2000. "Thermal conditions of work in rock mining headings ." *Prace Naukowe Instytutu Gornictwa Politechniki Wroclawskiej*, n.º 87: 47-58.
- Niemela, R., M. Hannula, S. Rautio, K. Reijula, e J. Railio. 2002. "The effect of air temperature on labour productivity in call centres - a case study." *Energy and Buildings* 34: 759-764.
- Nieto, A., e A. Duerksen. 2008. "The effects of mine safety legislation on mining technology in the USA ." *International Journal of Mining and Mineral Engineering* 1, n.º 1: 95-103.
- Nishi, Y. 1969. "Model Skin Temperature - An Index of Thermal Sensation in Cold Warm and Humid Environment." *Science Citation Index*.
- Nix, M. 2008. "Location aware mine machinery for productivity and safety improvements." *First International Future Mining Conference and Exhibition 2008, Proceedings*. 175-178.
- Ogola, J., W. Mitullah, e M. Omulo. 2002. "Impact of gold mining on the environment and human health: A case study in the Migori Gold Belt, Kenya." *Environmental Geochemistry and Health* 24, n.º 2: 141-158.

- Okely, Andrew. 2009. "Managing the downturn: Now is the time for excellence in operations." *Engineering & Mining Journal* 210, n.º 2: 54-55.
- Onder, Mustafa, Saim Saraç, e Neset Eren. 2005. "A computer program on the analysis and effects of heat stress in underground mines." *Madencilik* 44, n.º 4: 39-46.
- Orosa, J. 2009. "Research on general thermal comfort models." 27, n.º 2: 217-227.
- Orosa, J., e A. C. Oliveira. 2011. "A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models." *Renewable Energy: An International Journal* 36, n.º 3: 951-956.
- Ou, Xiao-Ying, et al. 2005. "Evaluation of thermal environment in mine and its application." *Journal of China University of Mining and Technology* 34, n.º 3: 323-326.
- Panigrahi, D., e R. Bhattacharjee. 2004. "Development of modified gas indices for early detection of spontaneous heating in coal pillars." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 104, n.º 7: 367-379.
- Parsons, K. 1999. "International standards for the assessment of the risk of thermal strain on clothed workers in hot environments." *Annals of Occupational Hygiene* 43, n.º 5: 297-308.
- Parsons, K. 2009. "Maintaining health, comfort and productivity in heat waves." Department of Human Sciences, Loughborough University, Loughborough, UK.
- Peacock, Michael. 1986. "Change in primary roof support system at Quarto mining company's Powhatan Número. 4 mine results in improved safety, productivity and costs. ." *5th Conference on Ground Control in Mining - Proceedings* . USA. 80-88.
- Peters, Robert H. 2002. "Strategies for improving miners' training." CDC Workplace Safety and Health Information Circular, National Inst. for Occupational Safety and Health (DHHS/PHS), Cincinnati, OH.
- Piekarski, C. 1995. "Climatic stress in coal-mining in Germany – Occupational health aspects." *Ergonomics* 38, n.º 1: 23-35.
- Pohl, C., W. Kriel, P. Venter, E. Van Heerden, e J. Albertyn. 2007. "The diversity of culturable airborne fungi in an active South African gold mine." *South African Journal of Science* 103, n.º 7/8: 277-278.
- Potts, T., K. Smith, e J. Hylko. 2003. *Dispelling Myths and Misconceptions to Implement a Safety Culture*. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/827067-tLNYnh/native/> (acedido em 23 de Outubro de 2012).
- Pritchard, C.J. 2010. "Methods to improve efficiency of mine ventilation systems." *Trans Soc Min Metal Explor* 326: 34-38.
- Quinney, B., G. McGwin, J. Cross, F. Valent, A. Taylor, e L. Rue. 2002. "Thermal burn fatalities in the workplace, United States, 1992 to 1999." *Journal of Burn Care & Rehabilitation* 23, n.º 5: 305-310.
- Rawlins, C. 2006. "Underground mine ventilation planning, heat loads, and diesel equipment." *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*. 75-80.
- Rawlins, C., e H. Phillips. 2005.. "Underground mine ventilation planning and design with regards to heat load and cooling mechanisms." *Eighth International Mine Ventilation Congress 2005*, (6): 111-121.
- Ribeiro, B. 2010. *Calor, Fadiga e Hidratação*. Alfragide: Texto Editores.

- Roberts, M. 1995. "Productivity improvement case study: Use of the true TQM in developing Australia's largest underground coal mine." *Proceedings of the 1995 PACRIM Congress, Conference Series - Australasian Institute of Mining & Metallurgy*. Auckland, New Zealand. 491.
- Roberts, M. 2005. "Understanding organisational and personal behaviours to sustain high productivity and safety." *Science & Technology Proceedings*.
- Rodrigues, C., J. Guedes, e J. Santos Baptista. 2011. "Ambiente térmico e o seu impacto no homem - Análise numa perspectiva homem/ambiente/trabalho." *CLME'2011*. Maputo. 3711A.
- Sá, M., R. Azevedo, e J. Tavares. 2010. "Avaliação do ambiente térmico em contexto laboral." <http://www.spso.pt/8CNSO2010/programa.php> (acedido em 24 de outubro de 2010).
- Sá, Ricardo. 1999. "Introdução ao "stress" térmico em ambientes quentes." <http://www.factor-segur.pt/artigosA/artigos/Introducao%20Stress%20termico.pdf> (acedido em 19 de novembro de 2010).
- Saha, R., N. Samanta, e C. Dey. 2010. "Cardiac workload of dressers in underground manual coal mines." *Journal of Institute of Medicine* 32, n.º 2: 11-17.
- Sahay, N., N. Varma, A. Narayan, e S. Mondal. 2004. "Determination of air permeability of coal pillars in underground coalmines." *Journal of Mines, Metals and Fuels* 52, n.º 5-6: 90-94.
- Saleh, Joseph, e Amy Cummings. 2011. "Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards." *Safety Science* 49, n.º 6: 764-777.
- Sanmiquel, Lluís, Modesto Freijo, Joaquín Edo, e Josep M. Rossell. 2010. "Analysis of work related accidents in the Spanish mining sector from 1982-2006." *Journal of Safety Research* 41: 1-7.
- Sari, M., C. Karpuz, e A. Selcuk. 2001. "An international comparison of Turkish coal mining industry safety performance." *Mine Planning and Equipment Selection*. 917-922.
- Sari, M., H Duzgun, C. Karpuz, e A. Selcuk. 2004. "Accident analysis of two Turkish underground coal mines." *Safety Science* 42, n.º 8: 675-690.
- Sauer, Beverly A. 1992. "Sense and sensibility in technical documentation: How feminist interpretation strategies can save lives in the nation's mines." *Annual Meeting of the Conference on College Composition and Communication, 43rd*. Cincinnati, OH.
- Sauerborn, R., T. Kjellstrom, e M. Nilsson. 2009. "Health as a crucial driver for climate policy." *Global Health Action*.
- Scharp, Robert C. 1993. "No need to apologize about mining safety report card ." *AMC journal* 79, n.º 9: 9-10.
- Schulte, P., e H. Chun. 2009. "Climate change and occupational safety and health: Establishing a preliminary framework." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 6, n.º 9: 542-554 .
- Seppänen, O., W. Fisk, e D. Faulkner. 2005. "Control of temperature for health and productivity in offices." *ASHRAE*. Vol. III. n.º Part 2. 680-686.
- Serata, S., B. Gardner, e M. Preston. 1986. "Optimization of the Stress Control Method to Improve Productivity and Safety in Underground Coal Mining." *5th Conference on Ground Control in Mining - Proceedings* . USA. 156-166.

- Sereshki, F., M. Ataei, e M. Jamshidi. 2008. "Is coal mine operation without safety possible?" *8th International Scientific Conference - Proceedings*. 469-475.
- Sharpe, James. 2011. "Time is right for mine safety study." *Rock Products* 114, n.º 7: 40-40.
- Shi, W., e T. Gao. 2010. "Model of total factor productivity on coal mine safety efficiency." *Progress in Safety Science and Technology* VIII, Pts A and B, n.º 8: 75-80.
- Shi, XP. 2009. "Have government regulations improved workplace safety? A test of the asynchronous regulatory effects in China's coal industry, 1995-2006." *Journal of Safety Research* 40, n.º 3: 207-213.
- "Shiftwork training improves bottom line, study finds." 2005. *Academic Search Complete*.
- Silva, M. C. Gameiro. S.D. "Aplicações computacionais para avaliação do conforto térmico," DEM/FCT da Universidade Coimbra. <https://woc.uc.pt/efs/getFile.do?tipo=2&id=84> (acedido em 18 de novembro de 2010).
- Singh, L., A. Bhardwaj, e K. Deepak. 2010. "Occupational exposure in small and medium scale industry with specific reference to heat and noise." *Noise & Health* 12, n.º 46: 37-48.
- Smith, L., e D. Arthur. 1997. "Mine ventilation: waste heat recovery." *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress*. 25-29.
- Sousa, A., e J. Baptista. 2014. "Model to assess the economic impact of hot environments on productivity", accepted for the Special Issue on Emerging Issues and Methodological Challenges in Organisational Management: Cases, Experiences and Propositions, *International Journal of Environmental Technology and Management*, IJETM-62927.
- Srivastava, L., e A. Mehra. 1999. "Gevra opencast mine - A success story." *Journal of Mines, Metals and Fuels* 47, n.º 6: 134-137.
- Stapleton, J.M., H.E. Wright, S.G. Hardcastle, e G.P. Kenny. 2012. "Body heat storage during intermittent work in hot-dry and warm-wet environments." *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* 37, n.º 5: 840-849.
- Stewart, J. 1980. "Use of heat transfer and limiting physiological criteria as a basis for setting heat stress limits." *Compendex*.
- Stewart, J., e A. Van Rensburg. 1977. "Heat stress limits for men working in the gold mining industry." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 30, n.º 4: 85-98.
- Stewart, J., e A. Whiller. 1979. "Guide to the measurement and assessment of heat stress in gold mines." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 32, n.º 9: 169-178.
- Stewart, J., e C. Wyndham. 1975. "Suggested thermal stress limits for safe physiological strain in underground environments." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 76, n.º 1: 334-338.
- Steyn, M., e R. Minnitt. 2010a. "Thermal coal products in South Africa." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 110, n.º 10: 593-599.
- Steyn, M., e R. Minnitt. 2010b. "Pricing of South African thermal coal exports." *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 110, n.º 10: 601-609.
- Straton, J. 1972. "Effects of federal mine safety legislation on production productivity and costs." *Mining Congress Journal* 58, n.º 7: 19.

- Su, S., H. Chen, P. Teakle, e S. Xue. 2008. "Characteristics of coal mine ventilation air flows." *Journal of Environmental Management* 86, n.º 1: 44-62.
- Su, Z., A. Zhang, Q. Liu, e L. Min. 2008. "Study on application of heat pipe air cooler in mine cooling." *3rd International Symposium on Modern Mining & Safety Technology Proceedings*. 360-364.
- Su, Z., Z. Jiang, e Z. Sun. 2009. "Study on the heat hazard of deep exploitation in high-temperature mines and its evaluation index." *Procedia Earth and Planetary Science* 1, n.º 1: 414-419.
- Sun, J., S. Wang, T. Zhang, e Y. Liang. 2009. "Simulation of flow and temperature distribution in underground coal mines with porous fluid dynamics." *Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and Third International Conference on Built Environment and Public Health, Proceedings*. 393-400.
- Sun, Y., e Z. Li. 2007. "Research on the system dynamics model of coal mine safety in production." *Progress in Mining Science and Safety Technology*, n.º Pts A and B: 1117-1120.
- Szlazak, N., D. Obracaj, e M. Borowski. 2008. "Methods for controlling temperature hazard in Polish coal mines." *Archives of Mining Sciences* 53, n.º 4: 497-510.
- Szwedzicki, T. 2003. "Quality assurance in mine ground control management." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, n.º 4: 565.
- Talaia, M., e F. Rodrigues. 2006. "O organismo humano num ambiente de stresse térmico - caso de uma área com fornos." *Actas das XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española: "Aplicaciones Metereológicas" & 7º Encuentro Hispano-Luso de Metereologia: "Metereologia Y Eficiencia Energética"*. Pamplona.
- Talaia, Mário, e Filomena Rodrigues. 2008. "Conforto e Stress Térmico: Uma avaliação em Ambiente Laboral." Montagem por Gomes et al. *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*. Maputo, Moçambique. INEGI, 11A020.
- Tan, H., H. Wang, H. Ren, L. Chen, X. Fan, e Z. Yuan. 2010. "Analysis in law factor on China coal mine safety production based on dummy variable model." *Progress in Safety Science and Technology* VIII, Pts A and B, n.º 8: 2379-2384.
- Tanaka, M. 2007. "Heat Stress Standard for Hot Work Environments in Japan." *Industrial Health* 45, n.º 1: 85-90.
- Taylor, N. 2006. "Challenges to Temperature Regulation when Working in Hot Environments." *Industrial Health* 44, n.º 3: 331-344.
- Thomas, Randolph, e Iacovos Yiakoumis. 1987. "Factor model of construction productivity." *Journal of Construction Engineering and Management* 113, n.º 4: 632-639.
- Thomson, C. 1996. "Use of the chamber of mines program ENVIRON as a planning tool in coal mines." *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 49, n.º 1: 16-18.
- Tian, Z., N. Zhu, G. Zheng, e H. Wei. 2011. "Experimental study on physiological and psychological effects of heat acclimatization in extreme hot environments." *Building and Environment* 46, n.º 10: 2033-2041.
- Topp, V., L. Soames, D. Parham, e H. Bloch. 2008. "Productivity in the mining industry: Measurement and interpretation." Productivity Commission Staff Working Paper, Australian Government.

- Toraño, J., S. Torno, M. Menéndez, e M. Gent. 2011. "Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD modelling of dust behaviour." *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, n.º 1: 201-210.
- Travis, C., A. Young, e M. Dionisio. 2001. "Worker risk as a factor in technology selection." *Environmental Science and Pollution Research*, n.º 1: 52-55.
- Tsolas, I.E., e A.L. Petrakis. 2001. "Productivity and occupational safety in the Greek lignite mining ." *Computer Applications in the Minerals Industries*. 559-564.
- Tuck, M. 1997. "Control of mine climate." *Mining Technology* 79, n.º 912: 215-219.
- Tuminska, A., et al. 2010. "Analysis of the holter records in miners working at the deepest located work stations in copper mines of the Legnica-Glogow copper mining." *Medycyna Pracy* 61, n.º 1: 43-54.
- Ural, S., e S. Demirkol. 2008. "Evaluation of occupational safety and health in surface mines." *Safety Science* 46, n.º 6: 1016-1024.
- "Utilizing existing manufacturing data to calculate OEE." 2010. *Informetric Systems Inc.* <http://www.informetric.com/White%20Papers/Utilizing%20Existing%20Manufacturing%20Data%20to%20Calculate%20OEE.pdf> (acedido em 04 de fevereiro de 2013).
- Varley, F. 2004. "A study of heat stress exposures and interventions for mine rescue workers." *SME Annual Meeting Preprints*. 705-715.
- Vazirinejad, R., e A. Esmaeili. 2009. "Five-year follow up of job-related injuries among sarcheshme copper mine complex workers." *Pakistan Journal of Medical Sciences* 25, n.º 3, Part 2: 418-423 .
- Vogt, J. J. 1966. "Thermal environment determination using physiological stress index." *Science Citation Index*.
- Vogt, J. J. 1983. "Heart rate and spontaneous work-rest cycles during exposure to heat." *Compendex*.
- Von Glehn, F., e S. Bluhm. 2000. "Practical Aspects of the Ventilation of High-Speed Developing Tunnels in Hot Working Environments." *Tunnelling and Underground Space Technology* 15, n.º 4: 471-475 .
- Vutukuri, V., e R. Lama. S.D. *Environmental engineering in mines* . New York: Cambridge University Press, 504.
- Waclawik, J. 2010. "Numerical model of heat exchange between a worker body and the hot environment." *Archives of Mining Sciences* 55, n.º 3: 573-588 .
- Wagner, Horst. 2001. "The management of heat flow in deep mines." *Geomechanik und Tunnelbau* 4, n.º 2: 157-163.
- Walker, Simon. 2010. "Communications: Vital for safety and management." *Engineering & Mining Journal* 211, n.º 6: 34-41.
- Walker, Simon. 2012. "Surface mining technology: Safety and productivity going hand-in-hand." *Engineering and Mining Journal* 213, n.º 1: 16-18,20.
- Wang, J., X. Gao, e S. Jiao. 2009. "The application of vortex tube in deep mine cooling." *ICEET: 2009 International Conference on Energy and Environment Technology - Proceedings*. 395-398.

- Webber, R.C.W., R.M. Franz, W.M. Marx, e P.C. Schutte. 2003. "A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining." *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 103, n.º 5: 313-323.
- Webber-Youngman, R.C.W. 2005. "An integrated approach towards the optimisation of ventilation, air cooling and pumping requirements for hot mines ." *8th International Mine Ventilation Congress - Proceedings*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series. 75-84.
- White, L. 1984. "Mine ventilation - State of the art systems yield gains in health, safety, and worker productivity." *Engineering and Mining Journal* 185, n.º 10: 66-69.
- Whitehorn, M., T. Vincent, C. Debrunner, e J. Steele. 2003. "Stereo vision in LHD automation." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 21-29.
- Williamson, R., J. Carbo, B. Luna, e B. Webbon. 1999. "A thermal physiological comparison of two HAZMAT protective ensembles with and without active convective cooling." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 41, n.º 6: 453-463.
- Wingo, J., et al. 2008. "Heat acclimation of an adult female with a large surface area of grafted skin." *Journal of Burn Care & Research* 29, n.º 5: 848-851.
- Witterseh, T., D. Clausen, P. P. Wyon, e Geo. 2004. "The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on SBS symptoms and on the performance of office work." *Indoor Air* 14, n.º 8: 30-40.
- Wu, H., e A. Gillies. 1997. "The development of a personal response heat stress meter calibrated to the physiology of the range of employees within the mine workplace." *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress*. 255-261.
- Wyon, D. 2010. "Thermal and air quality effects on the performance of schoolwork by children." http://web1.swegon.com/upload/AirAcademy/Seminars/Documentation_2010/Rotterdam/David%20Wyon.PDF (acedido em 21 de Dezembro de 2011).
- Xie, Jun, Sheng Xue, Weimin Cheng, e Gang Wang. 2011. "Early detection of spontaneous combustion of coal in underground coal mines with development of an ethylene enriching system." *International Journal of Coal Geology* 85, n.º 1: 123-127.
- Xu, Xiaonan, e Aiping Chen. 2003. "Study on safe use of explosives in coal mines." *Proceedings of the 2003 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics - Theory and Practice of Energetic Materials*. 1107-1113 .
- Xu, Z., S. Wang, T. Zhang, e Y. Liang. 2009. "Development of a thermal zone diagram method to evaluate underground coal mine environments." *Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and Third International Conference on Built Environment and Public Health*. 1069-1076.
- Yang, Y., J. Stapleton, B. Diagne, G. Kenny, e L. Christopher. 2012. "Man-portable personal cooling garment based on vacuum desiccant cooling." *Applied thermal engineering* 47: 18.
- Yang, Y., Z. Ti, e D. Mu. 2007. "Pre-appraisal analysis of mine ventilation system with fuzzy comprehensive evaluation method." *Progress in Mining Science and Safety Technology*, n.º Pts A and B: 1848-1852.

- Yanqiang, D., Y. Zhao, Q. Xie, e M. Zhang. 2009. "The research of underground space thermal comfort index and comprehensive evaluation of micro-climate environment." *3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. 4.
- Yanqiang, Di, Qian Xie, Yu Zhao, e Dachao Zou. 2009. "The research on comprehensive evaluation system of underground space thermal comfort environment." *International Conference on Engineering Computation*. 12-16.
- Yard, E., et al. 2010. "Heat illness among high school athletes - United States, 2005-2009." *Journal of Safety Research* 41, n.º 6: 471-474.
- Yassin, Abdiaziz S. 2007. "Cost of lost work and bed days for US workers in private industry: National health interview survey, 2003." *Journal of Occupational & Environmental Medicine* 49, n.º 7: 736-747.
- Yi, W., e A. Chan. 2013. "Optimizing work-rest schedule for construction rebar workers in hot and humid environment." *Building and Environment* 61: 104-113.
- Yokota, M., G. Bathalon, e L. Berglund. 2008. "Assessment of male anthropometric trends and the effects on simulated heat stress responses." *European Journal of Applied Physiology* 104, n.º 2: 297-302.
- Youle, T., e K. Parsons. 2009. "The Thermal Environment." Vers. Technical Guide N.º. 12, (Addendum to Second Edition 1996). British Occupational Hygiene Society. http://www.bohs.org/uploadedFiles/Library/Publications/04_TG12_Addendum_to_2nd_Edition.pdf (acedido em 29 de outubro de 2010).
- Zabetakis, Michael. 1981. "Productivity and safety in U. S. bituminous coal mines." *Mining Congress Journal* 67, n.º 6: 19-21, 45.
- Zhai, X., e F. Li. 2007. "Study on minefield characteristics of small coal mines and their conformity questions." *Progress in Mining Science and Safety Technology*, Pts A and B: 1934-1939.
- Zhang, J., G. Fu, H. Qiu, e X. Zhou. 2007. "Exploration on coal mine accident causation analysis and prevention methods." *Proceedings of 2007 International Conference on Public Administration (3rd)*. 131-136.
- Zhang, T., M. Wang, M. Xie, e M. Jia. 2011. "Analysis of traumatic occupational fatalities in China." *American Journal of Industrial Medicine* 54, n.º 7: 560-564.
- Zhang, W., G. Zhou, W. Cheng, e H. Bie. 2007. "Mensuration of miner's thermal comfort degree index with relevant analysis and appraisal research." *Mine Hazards Prevention and Control Technology*,: 446-451.
- Zhang, Y., H. Sheng, e F. Zhang. 2002. "The role of prestressed anchor in mining safety." *Process in Safety Science and Technology* 3, n.º Part A: 278-282.
- Zhao, C., L. Wu, G. Lu, e W. Wei. 2007. "Analysis of Mine Heat Harm and Primary Researching of Coal Mine Drop-Temperature Techniques." *Mine Hazards Prevention and Control Technology*. 130-135.
- Zhao, J., N. Zhu, e S. Lu. 2009. "Productivity model in hot and humid environment based on heat tolerance time analysis." *Building and Environment* 44, n.º 11: 2202-2207.
- Zhou, K., D. Pan, Q. Chen, H. Deng, e N. Li. 2009. "Simulation experiment of non-coal mine based on system dynamics ." *Proceedings of the 9th Conference on Man-Machine-Environment System Engineering*. 235-240.

Anexos

Anexo 2.1

Resultados da pesquisa bibliográfica

Categoria de recurso: **Geral (1)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Heat Stress	Todos	Mining			5549	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Tópicos	Heat Stress	26	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; SCOPUS; Web of Science	26
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Tópicos	Thermal	20	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; SCOPUS; Web of Science	3
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Tópicos	> 2005	71	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; SCOPUS; Web of Science	6
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Tópicos	2000 - 2005	13	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; SCOPUS; Web of Science	6
Todos	Mining	Todos	Heat			28733	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Mining	Todos	Heat	Tópicos	Heat Mining	11	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0
Todos	Mining	Todos	Heat	Tópicos	Heat Treatment	15	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0

Categoria de recurso: **Geral (2)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nível1	Campo2	Nível2	Campo3	Nível3		Designação	
Todos	Mining	Todos	Safety			47184	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Mining	Todos	Safety	Tópicos	Mining Safety	31	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	7
Todos	Hot Environment	Todos	Mining			4620	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Hot Environment	Todos	Mining	Tópicos	In Mining	3	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	3
Todos	Hot Environment	Todos	Mining	Tópicos	Gold Mining	4	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0
Todos	Hot Environment	Todos	Mining	Ano	> 2005	83	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	4

Categoria de recurso: **Geral (3)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Hot Temperature	Todos	Mining			6395	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Hot Temperature	Todos	Mining	Tópicos	High-Temperature	13	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0
Todos	Hot Temperature	Todos	Mining	Ano	> 2005	71	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Todos	Hot Temperature	Todos	Mining	Ano	2000 - 2005	17	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Todos	Mining	Todos	Mines	Tópicos		290.387	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Mining	Todos	Mines	Tópicos	Miners	2	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Todos	Mining	Todos	Mines	Tópicos	Underground Coal Mines	8	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1

Categoria de recurso: **Geral (4)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Mining	Todos	Mines	Ano	> 2005	85	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	4
Todos	Mining	Todos	Mines	Ano	2000 - 2005	9	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index			32.458	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index	Tópicos	Thermal Environment	38	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	2
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index	Tópicos	Thermal Confort	27	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	3
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index	Tópicos	Annals of Occupat Hygien	3	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	4

Categoria de recurso: **Geral (5)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index	Ano	2000 - 2005	13	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Todos	Thermal Environment	Todos	Thermal Index	Ano	> 2005	87	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	6
Todos	Mining	Todos	Thermal Index			2.591	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	
Todos	Mining	Todos	Thermal Index	Ano	> 2005	70	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	2
Todos	Mining	Todos	Thermal Index	Ano	2000 - 2005	24	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	4
Todos	Mining	Todos	Thermal Index	Tópicos	Heat	10	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	4

Categoria de recurso: **Geral (6)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nível1	Campo2	Nível2	Campo3	Nível3		Designação	
Subject	Productivity Model	Autor	Zhao, J			1	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Title	Mine Productivity					54	Web of Science	7
Title	Mine Productivity					9	Science & Technology Proceedings	3
Title	Mine Productivity					1.041	Compendex	1
Title	Mine Productivity					41	Science Citation Index	1
Title	Mine Productivity					9	Academic Search Complete	3
Subject	Mmine Accident Rate					87	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	25
Title	Productivity Data in Mines					12	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Title	Productivity in Mines	Title	Safety in Mines			25	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	8
Title	Safety Data in Mines					5	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	3
Title	Safety	Title	Mine			258	Academic Search Complete	1

Categoria de recurso: **Geral (7)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Title	Safety	Subject	Mine Heat			26	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	3
Title	Safety	Subject	Heat Stress			152	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	2
Subject	Safety Index	Subject	Heat Stress			70	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	9
Subject	Heat Stress	Subject	Safety			0	Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	0
Subject	Safety	Subject	Heat Stress			3	Academic Search Complete	3
Subject	Safety	Subject	Heat Stress			355	Science Citation Index	31
Title	Safety	Title	Heat Stress			12	Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	1
Title	Heat Stress Mine					27	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	13

Categoria de recurso: **Geral (8)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Title	Mine Heat					318	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	12
Subject	Mining	Subject	Thermal			356	Current Contents	6
Subject	Mining	Subject	Thermal			694	Web of Science	26
Subject	Mining	Subject	Thermal			275	Science & Technology Proceedings	17
Subject	Mining	Subject	Thermal			491	Science Citation Index	4
Subject	Mining	Subject	Thermal	Topicos	Mining	5	Academic Search Complete; Compendex; Current Contents; ERIC; Inspec; Science Citation Index; Science & Technology Proceedings; SCOPUS; Web of Science	27
Subject	Mining	Subject	Thermal			30	Academic Search Complete	1

Categoria de recurso: **Engenharia (1)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Thermal Confort					28	Compendex; Inspec; Science Citation Index	
Todos	Thermal Confort	Ano	> 2005			2	Compendex; Inspec; Science Citation Index	0
Todos	Thermal Confort	Ano	2000 - 2005			6	Compendex; Inspec; Science Citation Index	0
Todos	Thermal Stress					103.893	Compendex; Inspec; Science Citation Index	
Todos	Thermal Stress	Ano	> 2005			30	Compendex; Inspec; Science Citation Index	0
Todos	Thermal Stress	Ano	2000 - 2005			11	Compendex; Inspec; Science Citation Index	0
Todos	Thermal Stress					453.226	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	
Todos	Thermal Stress	Todos	Human Health			31.014	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	

Categoria de recurso: **Engenharia (2)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Thermal Stress	Todos	Human Health	Ano	> 2005	95	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Thermal Stress	Todos	Human Health	Ano	2000 - 2005	20	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Thermal Stress	Todos	Human Health	Tópico	Safety	14	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Productivity					283.898	ASME; Nature.com; ScienceDirect	
Subject	Productivity	Subject	Mining			1.209	ASME; Nature.com; ScienceDirect	
Subject	Productivity	Subject	Mining	Tópico	Mining	12	ASME; Nature.com; ScienceDirect	1
Subject	Productivity	Subject	Mining	Tópico	Mining Industry	2	ASME; Nature.com; ScienceDirect	2

Categoria de recurso: **Engenharia (3)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Productivity					280.009	Ebrary; Referex; ScienceDirect	
Todos	Productivity	Ano	2000 - 2005			10	Ebrary; Referex; ScienceDirect	0
Todos	Productivity	Ano	> 2005			46	Ebrary; Referex; ScienceDirect	0
Todos	Productivity	Subject	Mining	Tópico	Mining	31	Ebrary; Referex; ScienceDirect	3
Abstract	Productivity	Abstract	Mining			23	Scitation	3
Todos	Thermal Stress					609	Compendex; Inspec; Science Citation Index	
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining	Tópico	Heat Stress	6	Compendex; Inspec; Science Citation Index	4
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Tópico	Mining	15	Compendex; Inspec; Science Citation Index	3
Todos	Thermal confort					28	Compendex; Inspec; Science Citation Index	0
Todos	Thermal Stress					453.392	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining			28.766	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	

Categoria de recurso: **Engenharia (4)**

Termo de Pesquisa						Número Ocorrências	Recursos utilizados	Interesse para o estudo
Campo1	Nivel1	Campo2	Nivel2	Campo3	Nivel3		Designação	
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining	Tópico	Mining	3	ACM Digital Library; ACS Journals; ASME Digital Library; CE Database (ASCE); IEEE Xplore; IOP Journals; nature.com; Royal Society of Chemistry; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining			16.863	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining	Ano	> 2005	36	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	1
Todos	Thermal Stress	Todos	Mining	Ano	2000 - 2005	2	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Heat Stress	Todos	Mining			16.380	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Ano	> 2005	35	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Heat Stress	Todos	Mining	Ano	2000 - 2005	3	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	0
Todos	Thermal Confort					356	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	
Todos	Thermal Confort	Tópicos	Thermal			11	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	1
Todos	Thermal Confort	Ano	> 2005			30	ASME Digital Library; nature.com; ScienceDirect; SIAM	0

Anexo 2.2

Método de cálculo do índice de conforto térmico PMV

Equações para determinação de PMV - Modelo de Fanger

(Adaptado da descrição proposta em (Silva s.d.))

Balanço Térmico do Corpo
Humano (S):

$$S = M + W \pm R \pm C \pm K - E \pm Res$$

em que:

M – Produção de calor metabólico

W – Trabalho mecânico exterior

R – Trocas por radiação com as superfícies envolventes

C – Trocas convectivas com as camadas de ar circundantes

K – Condução de ou para o vestuário

E – Perdas por evaporação devido à transpiração

Res – Trocas de calor sensível e latente na respiração

$$PMV = (0,303e^{-2,100 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M-W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$$

em que:

M - Nível de atividade metabólica;

W - Trabalho mecânico exterior;

H - Perda de calor sensível;

E_c - Trocas de calor por evaporação na pele;

C_{res} - Trocas de calor por convecção na respiração;

E_{res} - Trocas de calor evaporativas na respiração.

Os termos **H**, **E_c**, **C_{res}**, e **E_{res}**, são calculados a partir das seguintes equações:

$$H = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15]$$

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)$$

$$E_{res} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a)$$

em que:

f_{cl} – relação entre a área vestida e a área nua do corpo (adimensional);

t_{cl} – a temperatura da superfície exterior do vestuário (°C);

t_r – a temperatura média radiante (°C);

h_c – o coeficiente de troca de calor por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

t_a – temperatura do ar (°C);

M – a taxa de metabolismo (W/m^2)

W – trabalho mecânico exterior (W/m^2)

p_a – pressão parcial de vapor de água (Pa)

Cálculo iterativo da temperatura exterior do vestuário t_c (regime permanente):

$$(t_{sk} - t_{cl}) / I_{cl} = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

a partir da qual se pode expressar t_{cl} :

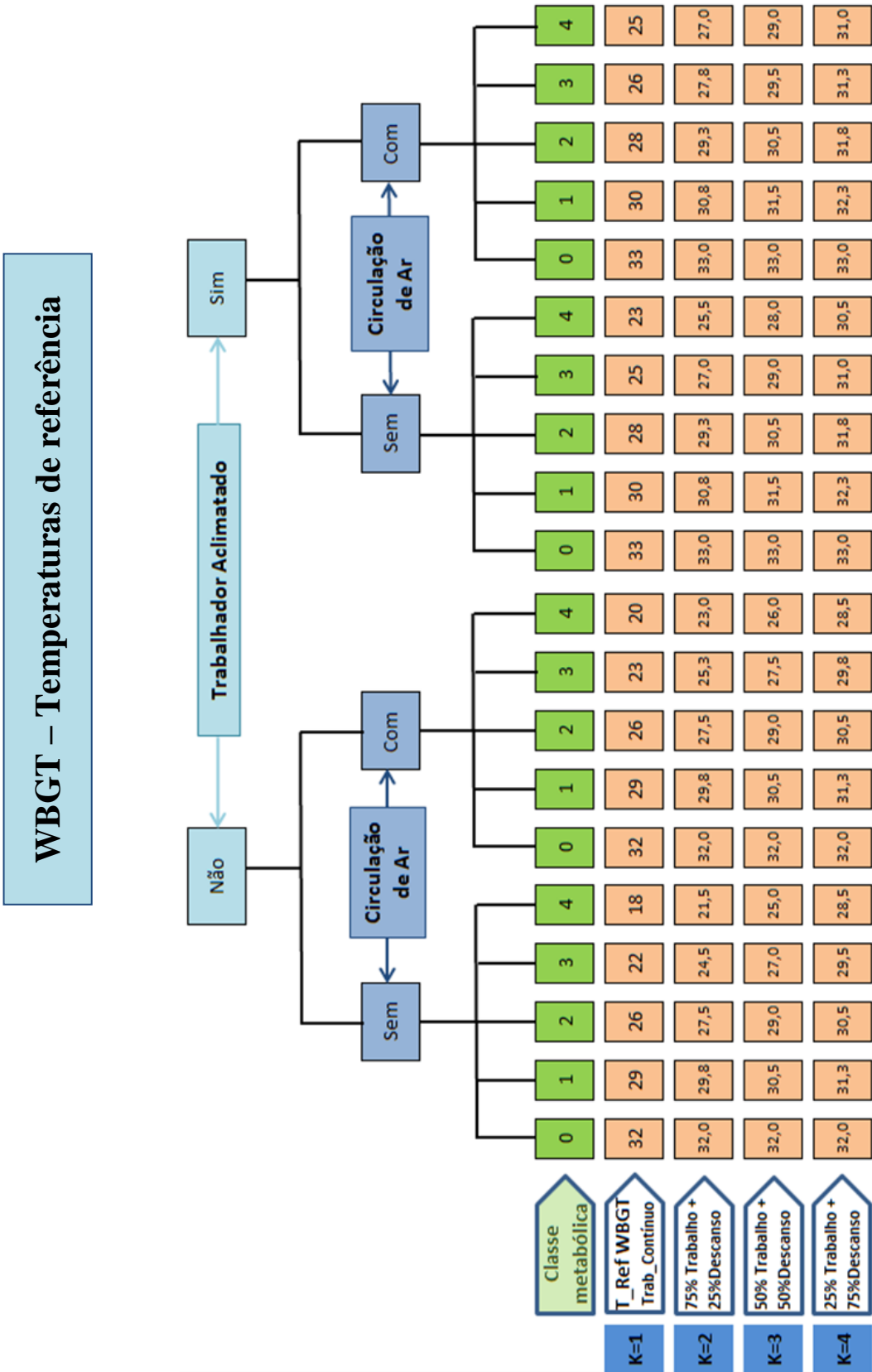
$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \cdot 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{eq} + 273)^4] - I_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{eq}),$$

sendo t_{sk} , o valor da temperatura exterior da pele, calculado a partir de:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028 (M - W).$$

Anexo 2.3

Temperaturas de referência para o índice WBGT



Anexo 3.1

Classes de taxa metabólica, segundo ISO 7243: 1989

Classificação de níveis de taxa metabólica (ISO 7243)

Class	Metabolic rate range, M		Value to be used for calculation of mean metabolic rate		Examples
	related to a unit skin surface area W/m^2	for a mean skin surface area of $1,8 m^2$ W	W/m^2	W	
0 Resting	$M \leq 65$	$M \leq 117$	65	117	Resting
1 Low metabolic rate	$65 < M \leq 130$	$117 < M \leq 234$	100	180	Sitting at ease : light manual work (writing, typing, drawing, sewing, book-keeping); hand and arm work (small bench tools, inspection, assembly or sorting of light materials); arm and leg work (driving vehicle in normal conditions, operating foot switch or pedal). Standing : drill (small parts); milling machine (small parts); coil winding; small armature winding; machining with low power tools; casual walking (speed up to 3,5 km/h).
2 Moderate metabolic rate	$130 < M \leq 200$	$234 < M \leq 360$	165	297	Sustained hand and arm work (hammering in nails, filling); arm and leg work (off-road operation of lorries, tractors or construction equipment); arm and trunk work (work with pneumatic hammer, tractor assembly, plastering, intermittent handling of moderately heavy material, weeding, hoeing, picking fruit or vegetables); pushing or pulling light-weight carts or wheelbarrows; walking at a speed of 3,5 km/h to 5,5 km/h; forging.
3 High metabolic rate	$200 < M \leq 260$	$360 < M \leq 468$	230	414	Intense arm and trunk work; carrying heavy material; shovelling; sledge hammer work; sawing, planing or chiselling hard wood; hand mowing; digging; walking at a speed of 5,5 km/h to 7 km/h. Pushing or pulling heavily loaded handcarts or wheelbarrows; chipping castings; concrete block laying.
4 Very high metabolic rate	$M > 260$	$M > 468$	290	522	Very intense activity at fast to maximum pace; working with an axe; intense shovelling or digging; climbing stairs, ramp or ladder; walking quickly with small steps, running, walking at a speed greater than 7 km/h.

Anexo 3.2

Fatores de isolamento térmico de vestuário típico, segundo ISO 7730

Coeficientes de isolamento térmico de vestuário (ISO 7730)

Work clothing	I_{cl}		Daily wear clothing	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Underpants, boiler suit, socks, shoes	0,70	0,110	Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Underpants, shirt, boiler suit, socks, shoes	0,80	0,125	Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear with long legs and sleeves, thermo-jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	1,40	0,220	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	2,00	0,310	Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Underwear with long sleeves and legs, thermo-jacket and trousers, Parka with heavy quilting, overalls with heavy quilting, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395	Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230

Anexo 3.3

Modelo de questionário de sensação térmica

Questionário sobre Sensação Térmica no Trabalho Subterrâneo

Nº.Func: _____ Nome: _____
 Frente Trabalho: _____ Data: ____/____/____ Hora: ____h____m

Por favor responda às seguintes questões, preenchendo ou assinalando com um 'X' os círculos que correspondem à sua opção:

1. De acordo com as condições de temperatura existentes, neste momento, no seu local de trabalho, assinale qual a sua atual sensação:

Muito Frio	Frio	Fresco	Neutro	Morno	Quente	Muito Quente
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2. Indique de que modo as condições de calor no seu posto de trabalho afetam:

	Piora	Não altera	Melhora
O seu cansaço ou fadiga	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
O seu nível de atenção e alerta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A sua destreza e habilidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Por favor, indique aqui os seus comentários e/ou sugestões adicionais:

Muito Obrigado pela colaboração.

Anexo 4.1

Fluxogramas de monitorização e controlo ambiental
(Valores limite definidos no D.L. número 162/90 e NP 1796 2007)

Legenda e Notas sobre os Fluxogramas:

SVP: Sistema de ventilação principal;

SVS: Sistema de ventilação secundária;

Alerta 1: Velocidade do ar à entrada é inferior ao limite mínimo (0.2 m/s);

Alerta 2: Velocidade do ar à saída é superior ao limite máximo (8 m/s);

Sub-rotina 0: Melhoria da qualidade do ar exterior a introduzir na mina, se os requisitos não forem cumpridos na admissão;

Sub-rotina 1: Melhoria da qualidade do ar interior na mina, se a qualidade de ar na extração for insuficiente e a velocidade do ar atingir o valor máximo permitido., antes de o admitir na mina;

Aquisição de dados:



Controlo de ventilação (incremento) :

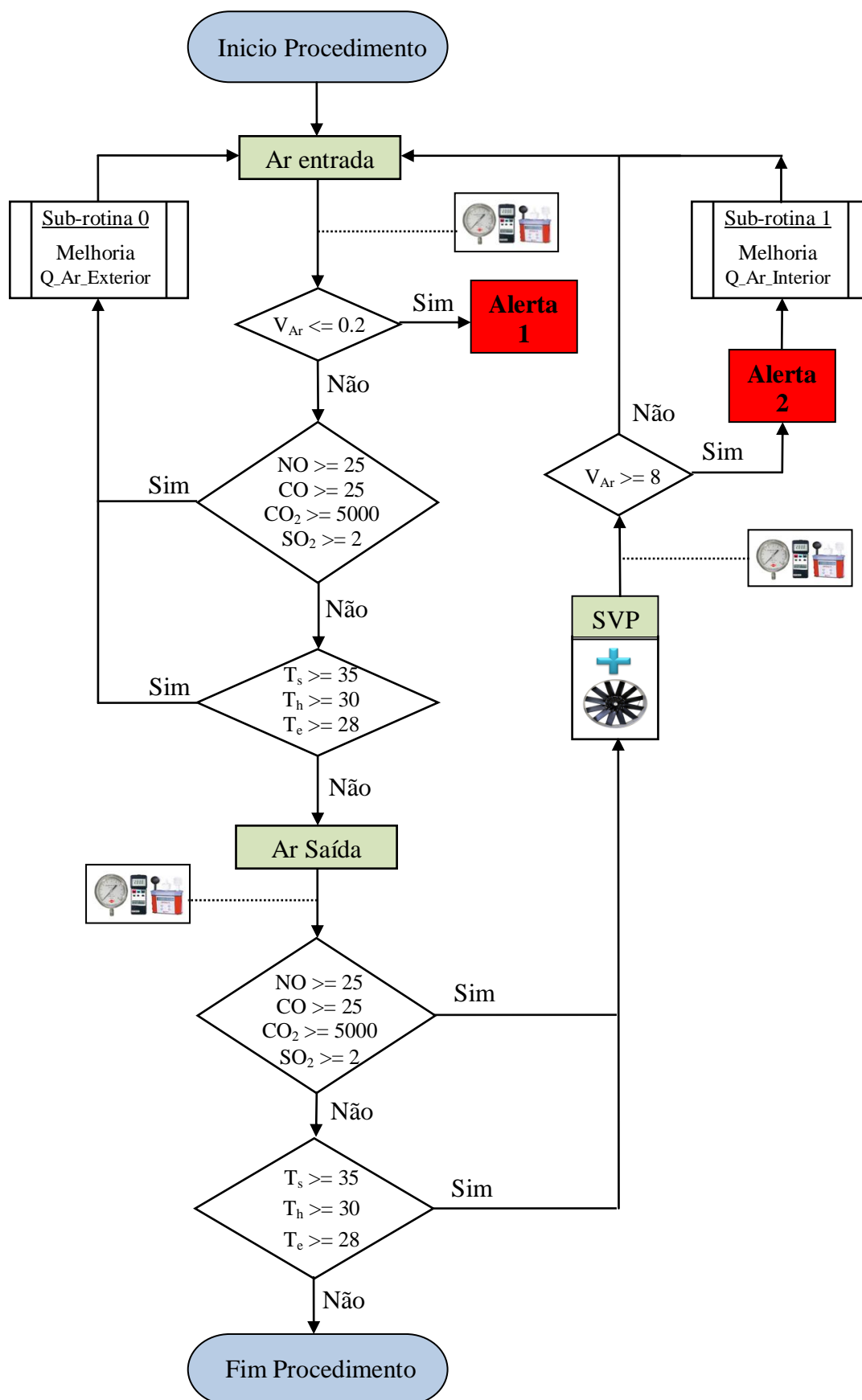


Unidades:	
V _{Ar}	m/s
NO, CO, CO ₂ , SO ₂	ppm
T _S , T _H ,	°C
O ₂ Ar	%
Q Ar	l/s
Conc. Poeiras	mg/m ³

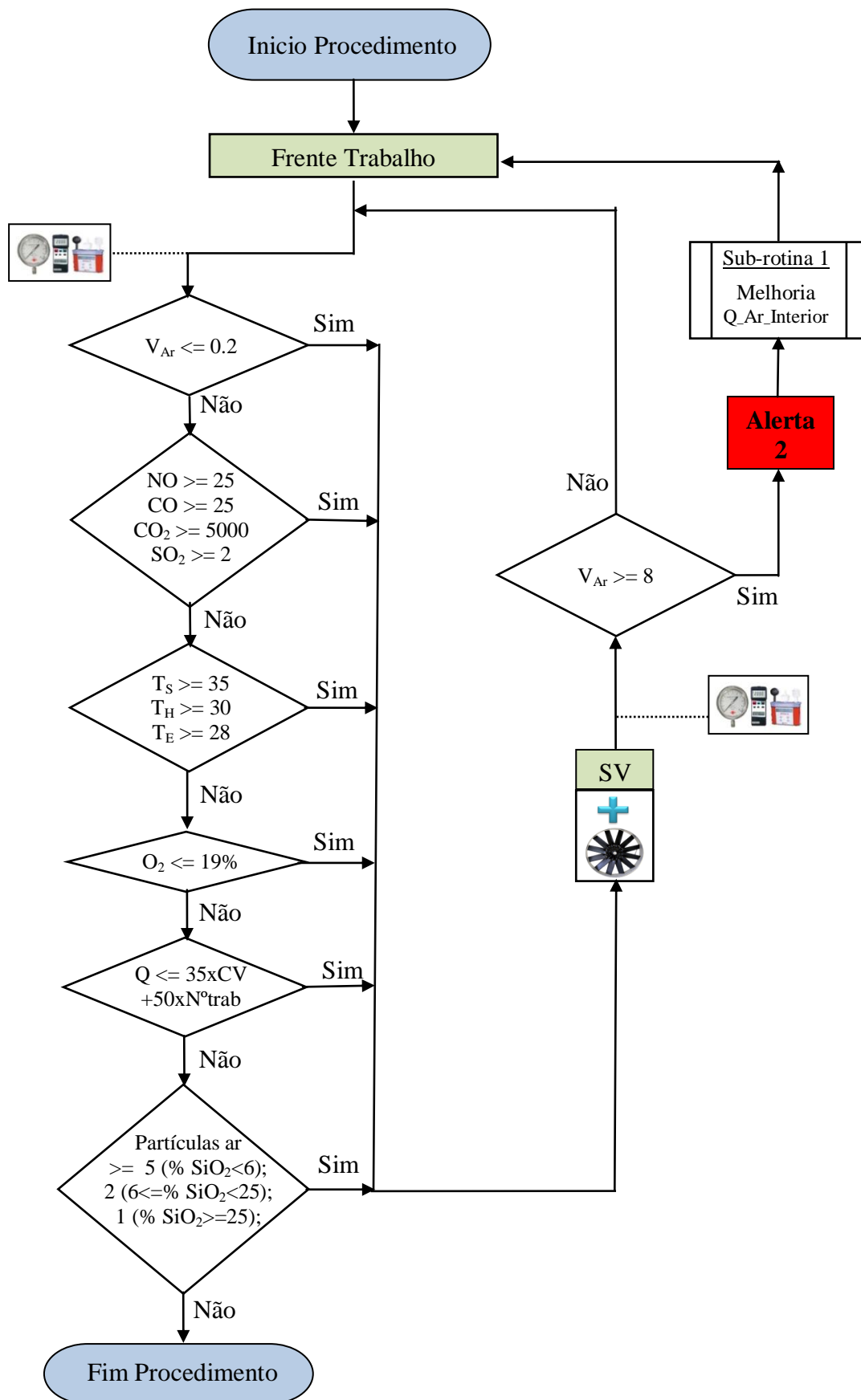
Temperatura equivalente:

$$T_e (^{\circ}\text{C}) = 0.7T_h (^{\circ}\text{C}) + 0.3T_s (^{\circ}\text{C}) - V_{Ar} (\text{m/s})$$

Monitorização e Controlo QAI (Mina) – Global (SVP)



Monitorização e Controlo QAI (Mina) – Localizado (SVS)



Anexo 4.2

Alternativas para obtenção dos custos de segurança no contexto mineiro

Custos de segurança para o contexto mineiro

Os *tempos fora da tarefa* (TFT_s) para esta situação podem ser obtidos de duas formas alternativas:

- Uma, semelhante ao proposto para a câmara climática, em que se contabilizam as ocorrências negativas e o tempo de imobilização médio que lhes está associado, nas mesmas condições do enunciado para aquele contexto, de onde resulta:

$$TFT_s = N^{\circ} AIQA * TRecup_{Médio} \quad (H) \quad \text{(Opção 1)}$$

em que:

$N^{\circ} AIQA$ – Número de acidentes, incidentes ou quase-acidentes ocorridos durante os ensaios;

$TRecup_{Médio}$ – Tempo médio de recuperação da situação normal.

- Outra, em que se analisam e convertem os índices de gravidade disponíveis, os quais refletem a evolução da situação da atividade na empresa, ao longo do tempo, em termos de tempo de trabalho perdido. Note-se que esta opção não está disponível no contexto laboratorial porque não existem registos (taxas, índices), em virtude dos ensaios a realizar serem ‘inovadores’ e, portanto, não se possuírem dados históricos relativos a esse tipo de ensaios.

Considere-se o Índice de Gravidade (I_g) dado por:

$$I_g = \frac{N^{\circ} \text{ dias úteis perdidos}}{N^{\circ} \text{ horas} * \text{homem trabalhadas}} * 1000$$

cujo valor é conhecido, para cada ambiente térmico característico (WBGT fixo).

Com base nesse valor, pode-se estimar o TFT_s , através da conversão do número de dias úteis perdidos em horas/minutos, considerando que a produção nas frentes de trabalho é de 6h/turno.dia²¹², conhecida também a composição de uma equipa de trabalho e, conseqüentemente, a sua disponibilidade total máxima (número horas*homem). Os TFT_s para esta opção resultam em:

$$TFT_s = \frac{I_g * N^{\circ} \text{ horas} * \text{homem trab}}{1000} * 6 \quad (H) \quad \text{(Opção 2)}$$

²¹² Descontando tempo de refeição (1/2h), subida/descida de/para a superfície (1h) e preparação do trabalho (1/2h) às normais 8 horas de trabalho diário.

Após obtenção dos TFT_s , por qualquer uma das opções indicadas, a conversão daqueles em euros é realizada através da respetiva multiplicação pelo valor que resulta da expressão 3.5, referida no ponto 3.2.3:

$$C_s = TFT_s * Custo Prod_Hora \quad (€)$$

em que:

$$Custo Prod_Hora \text{ (€/hr)} = \frac{Produção total em valor \text{ (€)}}{N^o \text{ equipas} * N^o \text{ turnos} * N^o \text{ horas produção diárias disponíveis}}$$

Anexo 5.1

Exemplos de protocolos para aquisição de dados:

- Estrutura de organização documental
- Modelo (M)
- Procedimento (PR)
- Instrução de trabalho (IT)
- Formulário (FR)

Estrutura de Organização de Documentos

A produção e organização da documentação de suporte à execução das atividades de recolha e registo de dados deverá ser estruturada, de modo a assegurar a sua coerência e consistência. Para o efeito, considera-se a seguinte tipologia de documentos:

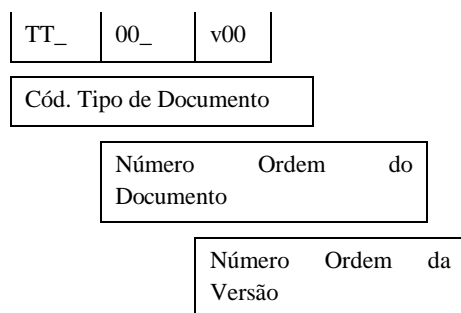
Modelos (MD): estruturas de documentos a serem usadas na elaboração dos mesmos, permitindo uniformizar a formatação dos diferentes tipos de documentos. Os modelos apresentam uma estrutura padrão, formatada de modo a facilitar a elaboração do respetivo documento, com indicação de como, onde e o que se deve preencher.

Procedimentos (PR): documentação onde se descrevem, extensa e detalhadamente, as práticas de trabalho. Os procedimentos incluem: Título, Objetivos, Âmbito, Responsabilidades, Descrição (texto escrito, esquemas, figuras, etc.) e quadro com elaboração, verificações, revisões, aprovações e respetivas versões.

Instruções de Trabalho (IT): Explicação detalhada de uma dada tarefa específica, com indicação dos seus passos sequenciais elementares. A informação pode ser apresentada de uma forma descritiva ou fazendo-se uso de esquemas, diagramas ou imagens que facilitem a compreensão da tarefa.

Formulários (FR): Servem de suporte para o registo dos dados recolhidos pelos utilizadores, podendo ser elaboradas e preenchidas em formato eletrónico (*Excel*, *Word*, *Access*) ou impressas e usadas em papel.

Os documentos são codificados utilizando três campos, de acordo com a seguinte estrutura:



em que:

- Código de Tipo de Documento

Identifica cada um dos tipos de documento definidos:

M_ – Modelo de Procedimento (MP), Instruções de Trabalho (MI) e Formulário (MF).

PR – Procedimento.

IT – Instrução de Trabalho.

FR – Formulário.

- Número de Ordem do Documento e da Versão

O número de ordem do documento permite sequenciar todos os documentos referentes ao mesmo grupo de documentos.

Exemplo: As referências PR_01_v00 e PR_02_v00 referem-se ambas a documentos de procedimentos. Porém, números de ordem diferentes significa que se trata de documentos relativos a procedimentos distintos.

A versão do documento deve ser alterada quando ocorre a aprovação de uma revisão do documento.

Em ambas as situações, a atribuição de números de ordem deve ser feita de forma sequencial, consultando para isso as listas que enumeram todos os documentos já existentes de cada um dos diferentes tipos, constantes nos formulários FR_05 a FR_08. Essas listas, que constam no Anexo I, são obrigatoriamente atualizadas sempre que ocorram atualizações dos números de ordem.

A codificação atribuída deve estar inscrita no documento correspondente: no seu início, na parte superior, alinhado à direita ou, em alternativa, no final do documento, imediatamente antes da zona de rodapé, alinhada à direita. A versão a utilizar deverá ser sempre a mais atual, de acordo com a informação das listas sequenciais do Anexo I.

A passagem de uma versão à seguinte é realizada através de um processo iterativo de revisão, composto por diversos documentos de trabalho. A evolução baseia-se, pois, em documentos intermédios que não constituem, em si mesmos, qualquer versão. Nesse sentido, não podem ser utilizados fora do processo de produção e desenvolvimento, até ser atingida a aprovação da última revisão.

Para identificar este tipo de documentos intermédios (que estabelecem a ‘ponte’ entre duas versões consecutivas) é utilizada a referência [rev_número ordem sequencial] após a identificação do documento inicial, objeto de alteração. No final do processo de evolução incremental e após aprovação da última revisão, substitui-se a versão inicial pela nova versão, à qual se atribui o número de ordem seguinte.

Exemplo: Considere-se a revisão do documento PR_05_v02. O primeiro documento será designado por PR_05_v02_rev00. Supondo que o processo envolve 5 revisões, o documento final do processo de revisão designa-se por PR_05_v02_rev05. Este último, após aprovação, dará origem ao documento PR_05_v03.

A codificação proposta permite diferenciar os documentos de desenvolvimento (com designação rev) das versões autorizadas para utilização.

Nas listas de registo de documentos (FR_05 a FR_08), as versões em vigor são identificadas por apresentarem os campos de data de atualização e responsável em branco.

Folha de Registo de Dados de Operação

Cod. Frente Trabalho: Data (dd / mm): Folha Registo nº

Equipa Trabalho				Operação	
Cod	Nome	ST	CM		
				Furação da bancada	
				Colocação de cabos de sustimento	
				Carregamento frentes	
				Portas de enchimento	

Identificação equipamentos (*)		Marca	Modelo
Estação Base			
Sensores	T _{Seca}		
	T _{Humida}		
	T _{Globo}		
	Velocidade Ar		
Pinça amplimétrica			

			[cm]	Vestuário	
Posição estação Ambiente térmico (cm)	Distância à frente de desmonte	X		Normal	
	Distância a cada uma das paredes laterais	Yesq		Refletor	
		Ydir		Impermeável	
	Altura dos sensores	Z		Outro: _____	

Ambiente térmico		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Grandeza	Unid	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temp. BolboSeco	°C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temp. BolboHumido	°C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temp. Globo	°C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Humidade Relativa	%	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Velocidade Ar	m/s	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Ventilação	Vent n°	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Intensidade	[A]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Distância saída/manga ventilação á frente de trabalho [cm]	Vent n°	<input type="text"/>	Vent n°	<input type="text"/>	Vent n°	<input type="text"/>	Vent n°	<input type="text"/>
--	---------	----------------------	---------	----------------------	---------	----------------------	---------	----------------------

ST - Sensor temperatura ingerível

CM - Classe taxa metabólica (0,...,4)

(*) Especificações e características técnicas apresentadas na folha de registo de equipamentos.

	Elaboração	Verificação	Revisão	Aprovação Equipa			Aprovação empresa
Data:	12/06/02						
Responsável:	AOS						
Designação nova revisão:				Designação versão final:			

Procedimento 10: Montagem da Estação de Aquisição de Dados de Ambiente Térmico

Objetivos:	Equipamento a utilizar para a medição e recolha de dados
Âmbito aplicação:	Em todas as frentes de trabalho, equipas e atividades a monitorar
Executante:	Membro da equipa de investigação, com funções de recolha de dados

Descrição:
<p>O equipamento é constituído por três conjuntos de elementos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estação base para medição e registo. 2. Sensores individuais, para cada grandeza a medir (Temp. bolbo seco, húmido e globo, humidade relativa e velocidade do ar). 3. Tripé de suporte e posicionamento da estação. <p>Montagem do equipamento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Retirar a unidade e acessórios das respetivas caixas/bolsas (estojos) de transporte, caso existam. 2. Arrumar as caixas/bolsas de transporte em zona afastada do desenvolvimento dos trabalhos e que não os perturbe. 3. Acoplamento de todos os sensores individuais à estação base. 4. Acoplamento da estação, equipada com os sensores, ao tripé de suporte. 5. Se necessário, humedecer bolbo húmido de acordo com indicações do fabricante. (IT_10) <p>Posicionamento do equipamento no local de medição, tendo em consideração:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. No sentido longitudinal (direção de ‘avanço’ da frente)(eixo x): Adotar a distância mínima possível à zona de trabalhos, de modo a que não perturbe o desenvolvimento das operações (trabalhadores e equipamentos). Esta distância depende do tipo de atividade (furação da bancada, colocação de cabos de sustimento, carregamento frentes ou portas de enchimento) podendo ser diferente para cada tipo. No entanto, para os mesmos tipos de trabalho, deve ser adotada a mesma distância (mínima) nas diversas medições a realizar. 2. No sentido transversal ao avanço da frente (eixo y): Posicionar o equipamento igualmente afastado das paredes laterais (centrado) e distanciado das saídas das condutas do sistema de ventilação secundário, de modo a que o fluxo de ar por ele fornecido não incida diretamente na estação de medição. Considerando o observador posicionado junto à estação e de frente para a zona de trabalho, medir as distâncias às paredes laterais (yesq e ydir). 3. Na vertical (eixo z), a estação deve ser posicionada a uma altura que coloque os sensores 1.10m acima do solo (aproximadamente), altura equivalente ao abdómen de um trabalhador que efetue a sua atividade na posição em pé. 4. Após posicionamento, as coordenadas (x,y,z) finais devem ser registadas na FR_01 correspondente. <p>Após montagem de componentes e posicionamento da estação:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ligar a estação de medição e registo. 2. Registrar data e hora, no local definido para o efeito, na parte superior do suporte de registo (FR_01). 3. Antes de se iniciar o registo/guarda de leituras (FR_01), aguardar (mínimo 10 min) pela estabilização dos valores medidos (em especial, do globo para medição da temperatura radiante que, usualmente, possui um tempo de resposta característico superior ao dos restantes sensores).

	Elaboração	Verificação	Revisão
Data:	2012/05/29		
Responsável:	AOS		

Designação nova revisão:

Aprovação Equipa			Aprovação empresa

Designação versão final:

Carregamento Fonte de Energia

Tarefa	Recarregamento das fontes de energia dos equipamentos (diário)
Periodicidade	Sempre, no final de cada turno de trabalho

Descrição
<p>De acordo com o tipo de fonte de energia utilizado em cada unidade de monitorização, proceder de um dos seguintes modos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se acumulador recarregável (tipo bateria), proceder sempre à sua recarga no final da utilização, de modo a estar totalmente carregado no início da utilização seguinte; 2. Se acumulador não recarregável (tipo pilha), <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Se consumo de energia do equipamento for baixo e a duração estimada da(s) pilha(s) permitir a sua utilização por um período alargado (de vários dias), juntar ao equipamento um número idêntico de pilhas novas, carregadas e do mesmo tipo, para que as mesmas possam ser substituídas, a qualquer momento, se se verificar a inoperacionalidade das que estão em serviço; 2.2 Se a duração estimada da(s) pilha(s) permitir apenas a sua utilização no período de um dia ou turno, proceder à sua substituição no final do turno, por idêntico número e tipo de pilha(s), com carga plena, de modo a garantir a sua operacionalidade no período seguinte.

	Elaboração	Verificação	Revisão
Data:	12/06/03		
Responsável:	AOS		

Designação nova revisão:

Aprovação Equipa			Aprovação empresa

Designação versão final:

Identificação e Verificação de Equipamentos: Estação AmbTerm

Equipamento	Marca	Modelo	NúmeroSérie/Ref ^a
Estação de aquisição de dados de ambiente térmico			
Caraterísticas técnicas / Observações			

Acessórios	Sensores/Outros	Medições		Limites aplicação	
		Amplitude	Precisão	Temperatura	Humidade
	Temperatura bolbo seco				
	Temperatura bolbo húmido				
	Temperatura globo				
	Humidade relativa				
	Velocidade ar				
	Fonte alimentação			Quant.	Dif.Potencial.(v)
	Acumulador recarregável				
	Pilhas				
Observações					

ANEXO 5.2

Folha de cálculo *Excel - Set 0_T*

Exemplo de sequência de expressões de cálculo do *Set 0_T*, utilizadas para determinação do custo global (*Excel*), em função do valor da variável independente WBGT (célula B6).

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4		Set 0_T	Eq. 4.2	Eq. 4.5	Eq. 4.7	Eq. 4.17	
5			Z	Ce	Cs	Cp	
6		WBGT	=+D6+E6+F6	=0,032614*C11	=+D11*E11	=+F11+C16	
7							
8							
9			Eq. 4.20	Eq. 4.6		Eq. 4.12	
10			I	TFTs	CunitTFT	CTFTp	
11			=-1,067*B6+35,2	=+D16*E16	=+Variav_const!!\$5	=+C26*\$!\$39	
12							
13							
14			Eq. 4.16				
15			CTFTDR	N° AIQA	tRecupmedio	D	
16			=+C31*\$!\$39	=+Variav_const!!\$6	=+Variav_const!!\$7	=+Variav_const!!\$8	
17							
18							
19			Eq. 4.22	Eq. 4.24		Eq. 4.27	
20			t	TFTtci	% tdescans	TFTwbgt	
21			=-0,133*B6+4,4	=0,133*B6-2,4	Não se aplica	=0,25*B6-6,25	
22							
23							
24			Eq. 4.11	Eq. 4.29		Eq. 4.14	
25			TFTp	V	Vpadrão	DR	
26			=MÁXIMO(D21,F21)	=-0,1133*B6+3,74	=+Variav_const!!\$14	=1-(D26/E26)	
27							
28							
29			Eq. 4.31	Eq. 4.13			
30			TFTdr	Produtividade			
31			=0,1333*B6-2,4	=(1-(C26/F16))*100			
32							
33							

Notas:

- Para cada variável a determinar é indicado o número da equação respetiva (fundo verde), de acordo com a nomenclatura utilizada no texto.
- Com fundo azul são indicadas as variáveis que, em situação real, serão medidas. Excecionam-se o AIQA e tRecupmedio, que se estipularam nesta aplicação como constantes (ver quadro 5.2).
- Com fundo castanho, indicam-se os valores das constantes utilizadas, as quais se encontram definidas na folha de cálculo designada por “Variav_const” que integra o mesmo livro.

ANEXO 5.3

Valores parcelares – Teste *Set 0_T*

Cálculos parcelares – Set 0

		Custos											
		Eq. 4.2	Eq. 4.5	Eq. 4.7	Eq. 4.17	Eq. 4.20	Eq. 4.6			Eq. 4.12	Eq. 4.16		
		Total	Energia	Segurança	Produtividade	I	TFTs	CunitTFT		CTFTp	CTFTDR	N° AIQA	tRecupmedio
wbgt	18	0,52	0,52	0	0,00	15,99	0	1,00		0,00	0,00	0	8
	19	0,75	0,49	0	0,26	14,93	0	1,00		0,13	0,13	0	8
	20	0,98	0,45	0	0,53	13,86	0	1,00		0,26	0,27	0	8
	21	1,21	0,42	0	0,79	12,79	0	1,00		0,39	0,40	0	8
	22	1,44	0,38	0	1,06	11,73	0	1,00		0,53	0,53	0	8
	23	1,67	0,35	0	1,32	10,66	0	1,00		0,66	0,67	0	8
	24	1,90	0,31	0	1,59	9,59	0	1,00		0,79	0,80	0	8
	25	2,14	0,28	0	1,86	8,53	0	1,00		0,93	0,93	0	8
	26	2,37	0,24	0	2,12	7,46	0	1,00		1,06	1,07	0	8
	27	2,60	0,21	0	2,39	6,39	0	1,00		1,19	1,20	0	8
	28	2,83	0,17	0	2,66	5,32	0	1,00		1,32	1,33	0	8
	29	3,06	0,14	0	2,92	4,26	0	1,00		1,46	1,47	0	8
	30	3,29	0,10	0	3,19	3,19	0	1,00		1,59	1,60	0	8
	31	3,52	0,07	0	3,46	2,12	0	1,00		1,72	1,73	0	8
	32	3,90	0,03	0	3,87	1,06	0	1,00		2,00	1,87	0	8
	33	4,00	0,00	0	4,00	-0,01	0	1,00		2,00	2,00	0	8

		Eq. 4.22	Eq. 4.24			Eq. 4.27	Eq. 4.11	Eq. 4.29			Eq. 4.14	Eq. 4.31	Eq. 4.13
		t	TFTtoi	% tdescans	TFTwbgt	TFTp	V	Vpadrão		DR	TFTdr		Produtividade
wbgt	18	2,0	0,0		0	0,0	1,70	1,7		0,00	0,0		100,0
	19	1,9	0,1		0	0,1	1,59	1,7		0,07	0,1		93,7
	20	1,7	0,3		0	0,3	1,47	1,7		0,13	0,3		87,0
	21	1,6	0,4		0	0,4	1,36	1,7		0,20	0,4		80,4
	22	1,5	0,5		0	0,5	1,25	1,7		0,27	0,5		73,7
	23	1,3	0,7		0	0,7	1,13	1,7		0,33	0,7		67,1
	24	1,2	0,8		0	0,8	1,02	1,7		0,40	0,8		60,4
	25	1,1	0,9		0	0,9	0,91	1,7		0,47	0,9		53,8
	26	0,9	1,1		0,25	1,1	0,79	1,7		0,53	1,1		47,1
	27	0,8	1,2		0,5	1,2	0,68	1,7		0,60	1,2		40,5
	28	0,7	1,3		0,75	1,3	0,57	1,7		0,67	1,3		33,8
	29	0,5	1,5		1	1,5	0,45	1,7		0,73	1,5		27,2
	30	0,4	1,6		1,25	1,6	0,34	1,7		0,80	1,6		20,5
	31	0,3	1,7		1,5	1,7	0,23	1,7		0,87	1,7		13,9
	32	0,1	1,9		2	2,0	0,11	1,7		0,93	1,9		0,0
	33	0,0	2,0		2	2,0	0,00	1,7		1,00	2,0		0,0

Nota: Para a determinação de TFT_{wbgt} foram consideradas as condições de $Ar_{sensível}$ =Não; Aclimat=Sim e CM=3. Nessas condições, para valores de WBGT iguais ou inferiores a 25°C, trabalho contínuo (TFT_{wbgt} =0). Para valores de WBGT iguais ou superiores a 32°C, trabalho é interdito (TFT_{wbgt} =2).

ANEXO 5.4

Folha de cálculo *Excel* - Set 1

Exemplo de sequência de expressões de cálculo para o *Set 1*, utilizadas para determinação do custo global (*eExcel*), em função dos valores de temperatura do ar (T_a), humidade relativa (H_r) e WBGT.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4		Set 1	Eq. 4.2	Eq. 4.5	Eq. 4.7	
5		H_r	Z	Ce	Cs	
6		WBGT, T_a	=D6+E6+C11	=0,032614*D11	=+E11*C15	
7						
8						
9			Eq. 4.44	Eq. 4.20	Eq. 4.6	
10			Cp	I	TFTs	
11			=+C15*C20	=-1,067*B6+35,2	=+D15*E15	
12						
13						
14			CunitTFT	Nº AIQA	tRecupmedio	
15			=+Variav_const!!\$5	=+Variav_const!!\$6	=+Variav_const!!\$7	
16						
17						
18			Eq. 4.33			
19			Produtividade			
20			=+(0,0517*\$B6)+(0,0173*\$B5)-(0,00032*\$B6*\$B6)			
21			-(0,0000985*\$B5*\$B5)-(0,0000911*\$B5*\$B6)-1,459			
22						

Notas:

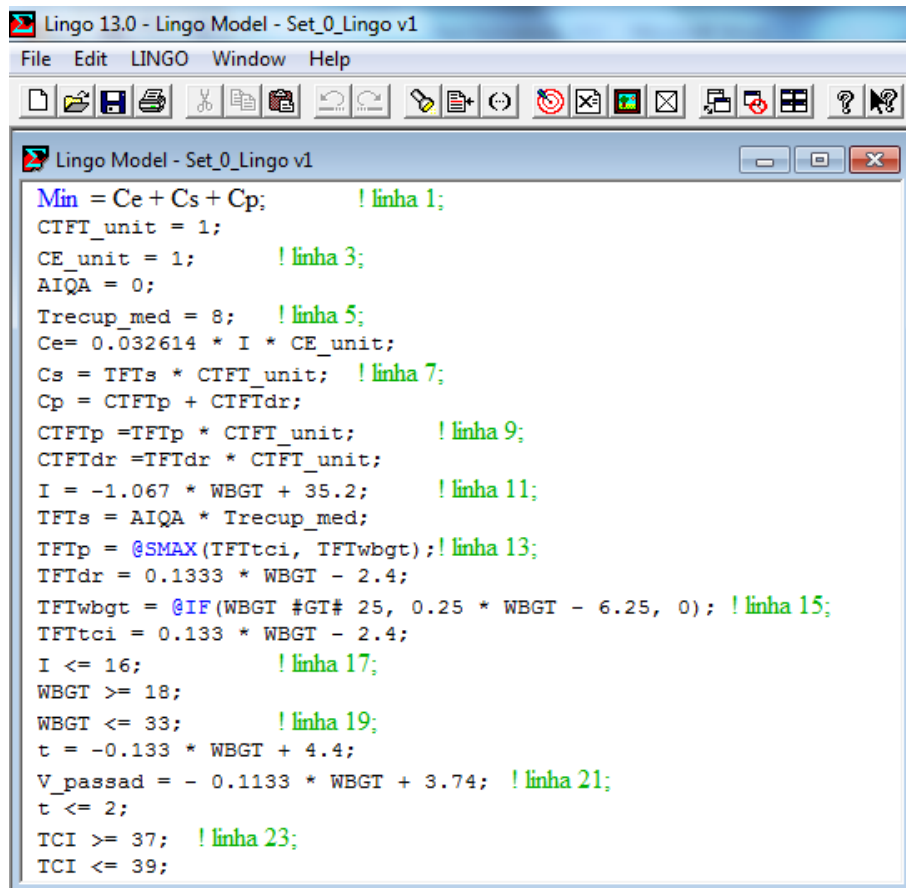
- Para cada variável a determinar é indicado o número da equação respetiva (fundo verde), de acordo com a nomenclatura utilizada no texto.
- Com fundo azul são indicadas as variáveis que, em situação real, serão medidas.
- Com fundo castanho, indicam-se os valores das constantes utilizadas, as quais se encontram definidas na folha de cálculo designada por “Variav_const” que integra o mesmo livro.

ANEXO 5.5

Software Lingo (Outputs) - Set 0_T e Variantes

Resultados obtidos pelo *software Lingo* para o modelo *Set_0_T*

Modelo:



```

Lingo Model - Set_0_Lingo v1
File Edit LINGO Window Help

Min = Ce + Cs + Cp;           ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 1;                 ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;             ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;      ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp =TFTp * CTFT_unit;    ! linha 9;
CTFTdr =TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;    ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMAX(TFTtci, TFTwbgt);! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                    ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                 ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                  ! linha 23;
TCI <= 39;

```

Solução:

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo v1]		
File Edit LINGO Window Help		
Local optimal solution found.		
Objective value:	0.5254720	
Infeasibilities:	0.000000	
Total solver iterations:	14	
Model Class: NLP		
Total variables:	13	
Nonlinear variables:	3	
Integer variables:	0	
Total constraints:	18	
Nonlinear constraints:	2	
Total nonzeros:	32	
Nonlinear nonzeros:	3	
Variable	Value	Reduced Cost
CE	0.5200584	0.000000
CS	0.000000	0.000000
CP	0.5413534E-02	0.000000
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000
CE_UNIT	1.000000	0.000000
AIQA	0.000000	0.000000
TRECUP_MED	8.000000	0.000000
I	15.94586	0.000000
TFTS	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	0.000000
CTFTDR	0.5413534E-02	0.000000
TFTP	0.000000	0.000000
TFTDR	0.5413534E-02	0.000000
WBG	18.04511	0.000000
TFTICI	0.000000	0.000000
TFTWBG	0.000000	0.000000
T	2.000000	0.000000
V_PASSAD	1.695489	0.000000
TCI	39.00000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.5254720	-1.000000
2	0.000000	-0.5413534E-02
3	0.000000	-0.5200584
4	0.000000	-8.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000
8	0.000000	-1.000000
9	0.000000	-1.000000
10	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-0.3261400E-01
12	0.000000	-1.000000
13	0.000000	-1.000000
14	0.000000	-1.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	-1.000000
17	0.5413534E-01	0.000000
18	0.4511278E-01	0.000000
19	14.95489	0.000000
20	0.000000	-1.740608
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	1.740608
23	2.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000

Análise de sensibilidade:

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo v1]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	2.830555	INFINITY
CP	1.000000	INFINITY	0.7389412
I	0.000000	0.9231571E-01	INFINITY
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
WBG	NONLINEAR	INFINITY	0.9850086E-01
TFTCI	NONLINEAR	INFINITY	0.7406080
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	INFINITY
T	0.000000	0.7406080	INFINITY
V_PASSAD	0.000000	0.8693810	INFINITY
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

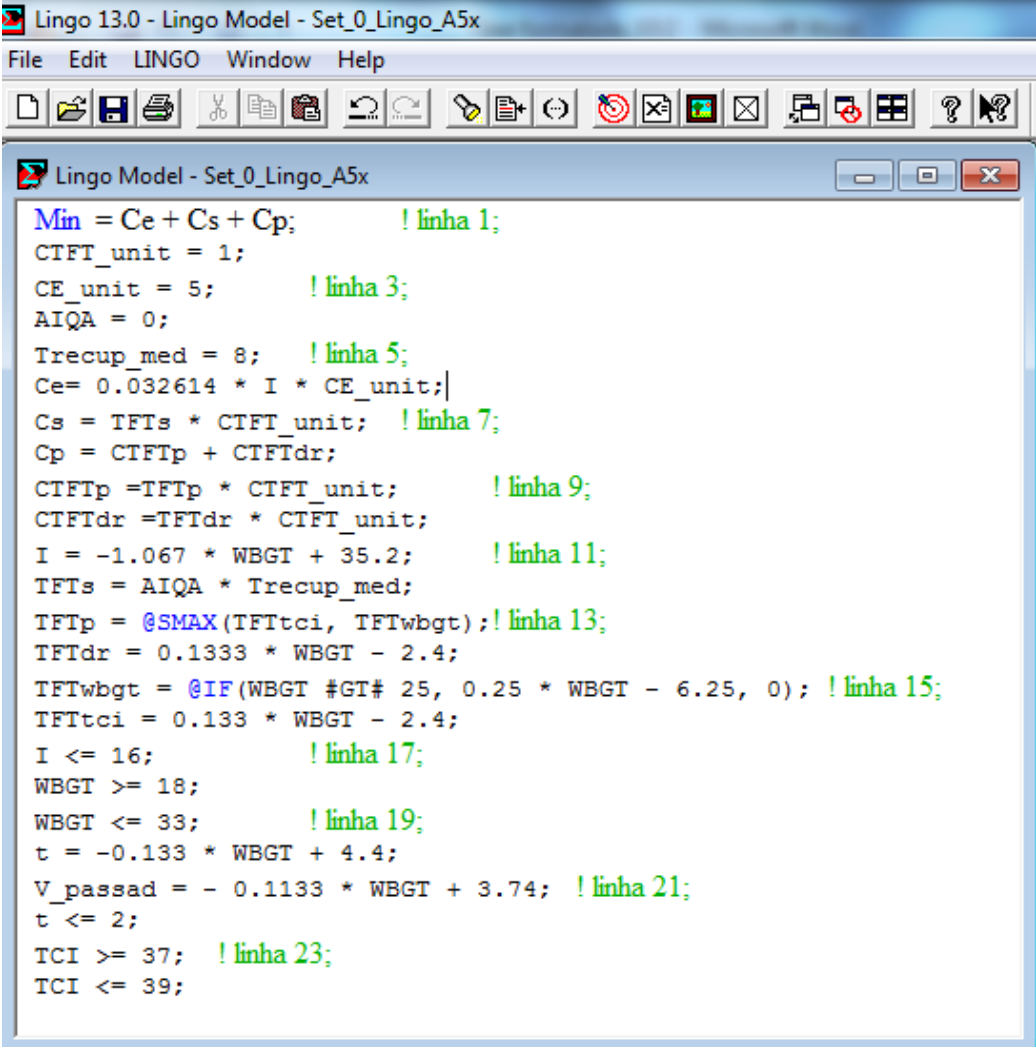
Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.5200584
8	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
11	35.20000	0.5413534E-01	15.94586
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	0.5413534E-02
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	0.5413534E-01
18	18.00000	0.4511278E-01	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	14.95489
20	4.400000	0.000000	0.000000
21	3.740000	INFINITY	1.695489
22	2.000000	0.000000	0.000000
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

Resultados obtidos pelo *software Lingo* para o modelo *Set_0_T*, variante A (5x)

Modelo (Variante A5x):



```

Lingo 13.0 - Lingo Model - Set_0_Lingo_A5x
File Edit LINGO Window Help

Min = Ce + Cs + Cp;           ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 5;                 ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;             ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;      ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp = TFTp * CTFT_unit;   ! linha 9;
CTFTdr = TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;    ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMAX(TFTtci, TFTwbgt); ! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                    ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                 ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                  ! linha 23;
TCI <= 39;

```


Solução (Variante A5x):

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo_A5x]		
File Edit LINGO Window Help		
Local optimal solution found.		
Objective value:	2.605706	
Infeasibilities:	0.000000	
Total solver iterations:	14	
Model Class:	NLP	
Total variables:	13	
Nonlinear variables:	3	
Integer variables:	0	
Total constraints:	18	
Nonlinear constraints:	2	
Total nonzeros:	32	
Nonlinear nonzeros:	3	
Variable	Value	Reduced Cost
CE	2.600292	0.000000
CS	0.000000	0.000000
CP	0.5413534E-02	0.000000
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000
CE_UNIT	5.000000	0.000000
AIQA	0.000000	0.000000
TRECUP_MED	8.000000	0.000000
I	15.94586	0.000000
TFTS	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	0.000000
CTFTDR	0.5413534E-02	0.000000
TFTP	0.000000	0.000000
TFTDR	0.5413534E-02	0.000000
WBGT	18.04511	0.000000
TFTTCI	0.000000	0.000000
TFTWBGT	0.000000	0.000000
T	2.000000	0.000000
V_PASSAD	1.695489	0.000000
TCI	39.00000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	2.605706	-1.000000
2	0.000000	-0.5413534E-02
3	0.000000	-0.5200584
4	0.000000	-8.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000
8	0.000000	-1.000000
9	0.000000	-1.000000
10	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-0.1630700
12	0.000000	-1.000000
13	0.000000	-1.000000
14	0.000000	-1.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	-1.000000
17	0.5413534E-01	0.000000
18	0.4511278E-01	0.000000
19	14.95489	0.000000
20	0.000000	-0.6940174
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.6940174
23	2.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000

Análise de sensibilidade (Variante A5x):

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo_A5x]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	-0.2338891	INFINITY
CP	1.000000	INFINITY	-0.3052940
I	0.000000	-0.3814029E-01	INFINITY
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFDR	0.000000	INFINITY	-0.3052940
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	INFINITY	-0.3052940
WBG	NONLINEAR	INFINITY	-0.4069569E-01
TFTCI	NONLINEAR	INFINITY	-0.3059826
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	INFINITY
T	0.000000	-0.3059826	INFINITY
V_PASSAD	0.000000	-0.3591853	INFINITY
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

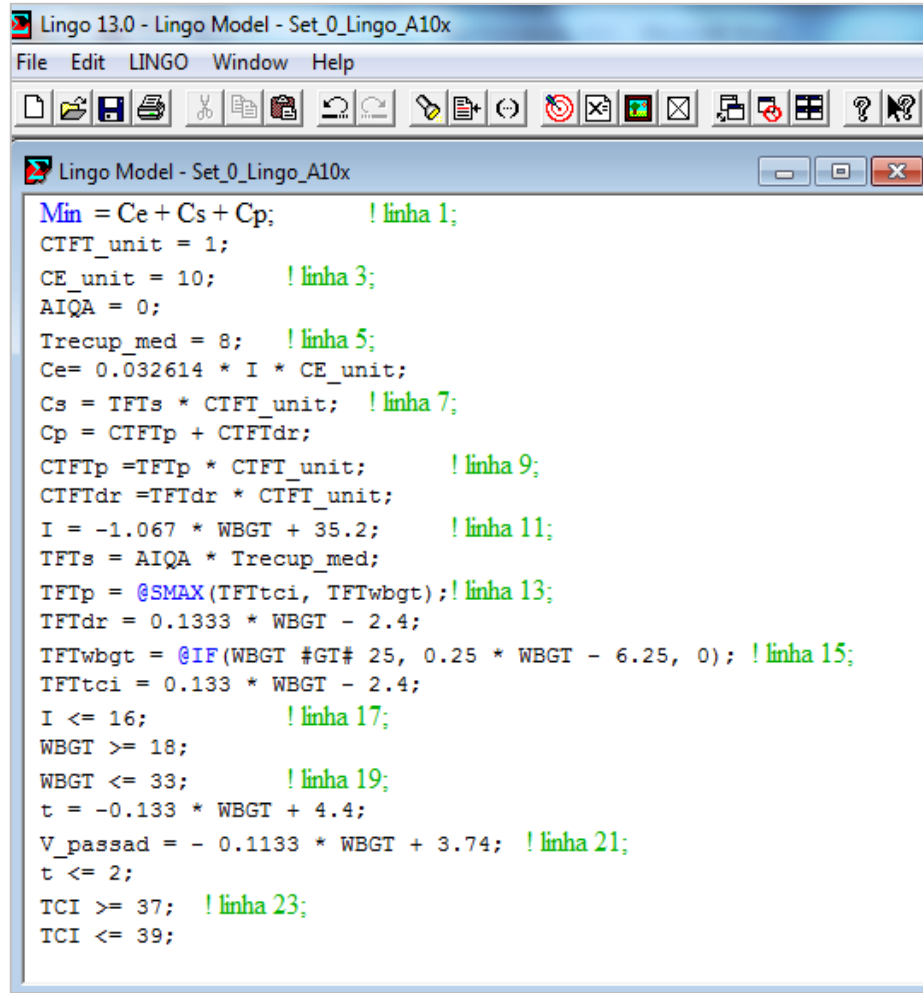
Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	2.600292
8	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
11	35.20000	0.5413534E-01	15.94586
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	0.5413534E-02
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	0.5413534E-01
18	18.00000	0.4511278E-01	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	14.95489
20	4.400000	0.000000	0.000000
21	3.740000	INFINITY	1.695489
22	2.000000	0.000000	0.000000
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

Resultados obtidos pelo software *Lingo* para o modelo *Set_0_T*, variante A (10x)

Modelo (Variante A10x):



```

Lingo 13.0 - Lingo Model - Set_0_Lingo_A10x
File Edit LINGO Window Help

Mim = Ce + Cs + Cp;           ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 10;                ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;              ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;       ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp = TFTp * CTFT_unit;    ! linha 9;
CTFTdr = TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;     ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMAX(TFTtci, TFTwbgt); ! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                      ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                   ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                    ! linha 23;
TCI <= 39;

```

Solução (Variante A10x):

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo_A10x]		
File Edit LINGO Window Help		
Feasible solution found.		
Objective value:	3.991993	
Infeasibilities:	0.000000	
Total solver iterations:	104	
Model Class:	NLP	
Total variables:	13	
Nonlinear variables:	3	
Integer variables:	0	
Total constraints:	18	
Nonlinear constraints:	2	
Total nonzeros:	32	
Nonlinear nonzeros:	3	
Variable	Value	Reduced Cost
CE	0.2912960E-01	0.000000
CS	0.000000	0.000000
CP	3.962863	0.000000
CIFT_UNIT	1.000000	0.000000
CE_UNIT	10.00000	0.000000
AIQA	0.000000	0.000000
TRECUP_MED	8.000000	0.000000
I	0.8931624E-01	0.000000
TFTS	0.000000	0.000000
CIFTP	1.976496	0.000000
CIFTDR	1.986368	0.000000
TFTP	1.976496	0.000000
TFTDR	1.986368	0.000000
WBG	32.90598	0.000000
TFTCI	1.976496	0.000000
TFTWBG	1.976496	0.000000
T	0.2350427E-01	0.000000
V_PASSAD	0.1175214E-01	0.7210184
TCI	39.00000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	3.991993	-1.000000
2	0.000000	-3.962863
3	0.000000	-0.2912960E-02
4	0.000000	-8.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000
8	0.000000	-1.000000
9	0.000000	-1.000000
10	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-0.3261400
12	0.000000	-1.000000
13	0.000000	-1.000000
14	0.000000	-1.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	-1.000000
17	15.91068	0.000000
18	14.90598	0.000000
19	0.9401709E-01	0.000000
20	0.000000	0.000000
21	0.000000	0.7210184
22	1.976496	0.000000
23	2.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000

Análise de sensibilidade (Variante A10x):

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo_A10x]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	0.000000	0.000000
CP	1.000000	0.000000	0.000000
I	0.000000	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	0.000000	0.000000
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	0.000000	0.000000
WBG	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTTCI	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	INFINITY
T	0.000000	0.000000	0.000000
V_PASSAD	0.000000	0.000000	0.000000
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

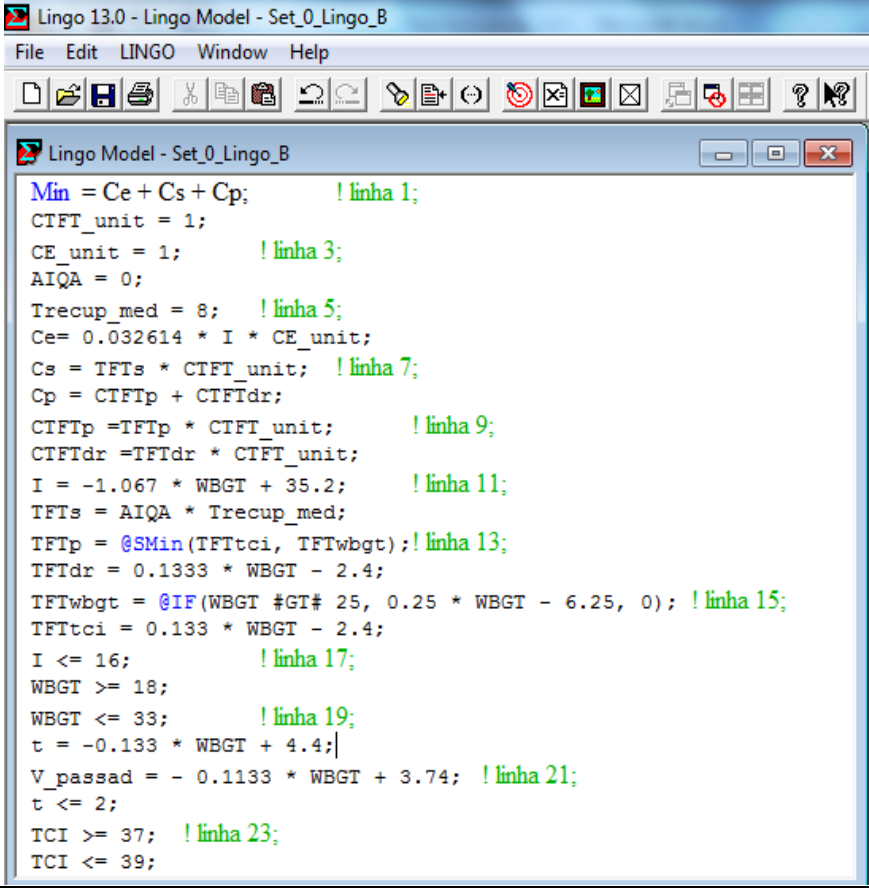
Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.2912960E-01
8	0.000000	INFINITY	3.962863
9	0.000000	INFINITY	1.976496
10	0.000000	INFINITY	1.986368
11	35.20000	15.91068	0.8931624E-01
13	NONLINEAR	INFINITY	1.976496
14	-2.400000	INFINITY	1.986368
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	15.91068
18	18.00000	14.90598	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	0.9401709E-01
20	4.400000	1.976496	0.2350427E-01
21	3.740000	0.000000	0.000000
22	2.000000	INFINITY	1.976496
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

Resultados obtidos pelo *software Lingo* para o modelo *Set_0_T*, variante B

Modelo (Variante B):



```

Lingo 13.0 - Lingo Model - Set_0_Lingo_B
File Edit LINGO Window Help

Lingo Model - Set_0_Lingo_B

Min = Ce + Cs + Cp;          ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 1;                ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;             ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;      ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp = TFTp * CTFT_unit;   ! linha 9;
CTFTdr = TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;    ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMin(TFTtci, TFTwbgt); ! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                    ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                 ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                  ! linha 23;
TCI <= 39;

```

Solução (Variante B):

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo_B]		
File Edit LINGO Window Help		
Local optimal solution found.		
Objective value:	0.5254720	
Infeasibilities:	0.000000	
Total solver iterations:	14	
Model Class: NLP		
Total variables:	13	
Nonlinear variables:	3	
Integer variables:	0	
Total constraints:	18	
Nonlinear constraints:	2	
Total nonzeros:	32	
Nonlinear nonzeros:	3	
Variable	Value	Reduced Cost
CE	0.5200584	0.000000
CS	0.000000	0.000000
CP	0.5413534E-02	0.000000
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000
CE_UNIT	1.000000	0.000000
AIQA	0.000000	0.000000
TRECUP_MED	8.000000	0.000000
I	15.94586	0.000000
TFTS	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	0.000000
CTFTDR	0.5413534E-02	0.000000
TFTP	0.000000	0.000000
TFTDR	0.5413534E-02	0.000000
WBG	18.04511	0.000000
TFTTCI	0.000000	0.000000
TFTWBG	0.000000	0.000000
T	2.000000	0.000000
V_PASSAD	1.695489	0.000000
TCI	39.00000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.5254720	-1.000000
2	0.000000	-0.5413534E-02
3	0.000000	-0.5200584
4	0.000000	-8.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000
8	0.000000	-1.000000
9	0.000000	-1.000000
10	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-0.3261400E-01
12	0.000000	-1.000000
13	0.000000	-1.000000
14	0.000000	-1.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	-1.000000
17	0.5413534E-01	0.000000
18	0.4511278E-01	0.000000
19	14.95489	0.000000
20	0.000000	-1.740608
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	1.740608
23	2.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000

Análise de sensibilidade (Variante B):

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo_B]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	2.830555	INFINITY
CP	1.000000	INFINITY	0.7389412
I	0.000000	0.9231571E-01	INFINITY
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	INFINITY	0.7389412
WBG	NONLINEAR	INFINITY	0.9850086E-01
TFTTCI	NONLINEAR	INFINITY	0.7406080
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	INFINITY
T	0.000000	0.7406080	INFINITY
V_PASSAD	0.000000	0.8693810	INFINITY
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

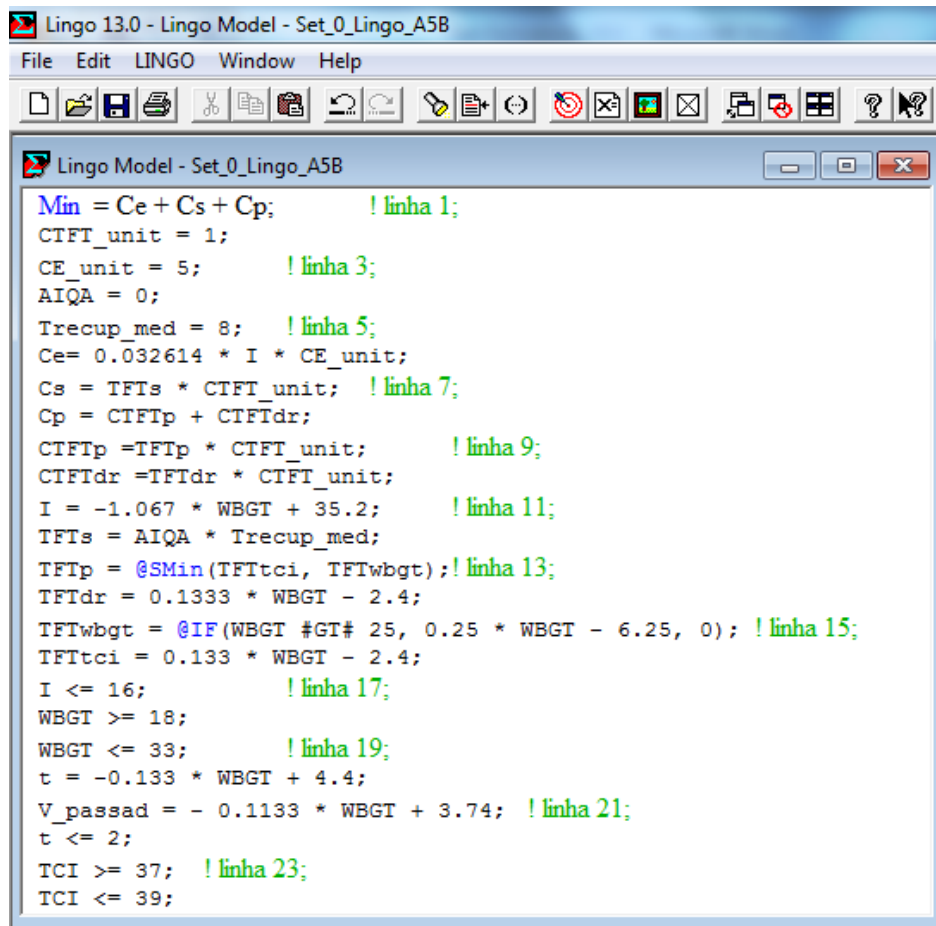
Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.5200584
8	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	0.5413534E-02
11	35.20000	0.5413534E-01	15.94586
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	0.5413534E-02
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	0.5413534E-01
18	18.00000	0.4511278E-01	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	14.95489
20	4.400000	0.000000	0.000000
21	3.740000	INFINITY	1.695489
22	2.000000	0.000000	0.000000
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

Resultados obtidos pelo *software Lingo* para o modelo *Set_0_T*, variante A5B

Modelo (Variante A5B):



```

Lingo 13.0 - Lingo Model - Set_0_Lingo_A5B
File Edit LINGO Window Help

Min = Ce + Cs + Cp;           ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 5;                 ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;             ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;      ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp = TFTp * CTFT_unit;   ! linha 9;
CTFTdr = TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;    ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMin(TFTtci, TFTwbgt); ! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                     ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                 ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                 ! linha 23;
TCI <= 39;

```

Solução (Variante A5B):

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo_A5B]			
File Edit LINGO Window Help			
Local optimal solution found.			
Objective value:	2.322672		
Infeasibilities:	0.2331523E-06		
Total solver iterations:	17		
Model Class:	NLP		
Total variables:	13		
Nonlinear variables:	3		
Integer variables:	0		
Total constraints:	18		
Nonlinear constraints:	2		
Total nonzeros:	32		
Nonlinear nonzeros:	3		
Variable	Value	Reduced Cost	
CE	1.390172	0.000000	
CS	0.000000	0.000000	
CP	0.9325001	0.000000	
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000	
CE_UNIT	5.000000	0.000000	
AIQA	0.000000	0.000000	
TRECUP_MED	8.000000	0.000000	
I	8.524999	0.000000	
TFTS	0.000000	0.000000	
CTFTP	0.000000	0.000000	
CTFTDR	0.9325001	0.000000	
TFTP	0.000000	0.000000	
TFTDR	0.9325001	0.000000	
WGBT	25.00000	0.000000	
TFTICI	0.9250001	0.000000	
TFTWGBT	0.000000	0.8372172	
T	1.075000	0.000000	
V_PASSAD	0.9074999	0.000000	
TCI	39.00000	0.000000	
Row	Slack or Surplus	Dual Price	
1	2.322672	-1.000000	
2	0.000000	-0.9325001	
3	0.000000	-0.2780343	
4	0.000000	-8.000000	
5	0.000000	0.000000	
6	0.000000	-1.000000	
7	0.000000	-1.000000	
8	0.000000	-1.000000	
9	0.000000	-1.000000	
10	0.000000	-1.000000	
11	0.000000	-0.1630700	
12	0.000000	-1.000000	
13	0.000000	-1.000000	
14	0.000000	-1.000000	
15	-0.2331523E-06	-0.1627828	
16	0.000000	0.000000	
17	7.475001	0.000000	
18	7.000001	0.000000	
19	7.999999	0.000000	
20	0.000000	0.000000	
21	0.000000	0.000000	
22	0.9250001	0.000000	
23	2.000000	0.000000	
24	0.000000	0.000000	

Análise de sensibilidade (Variante A5B):

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo_A5B]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	0.000000	0.000000
CP	1.000000	0.000000	0.000000
I	0.000000	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	0.000000	0.000000
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFTDR	0.000000	0.000000	0.000000
WBG	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTICI	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTWBG	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
T	0.000000	0.000000	0.000000
V_PASSAD	0.000000	0.000000	0.000000
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

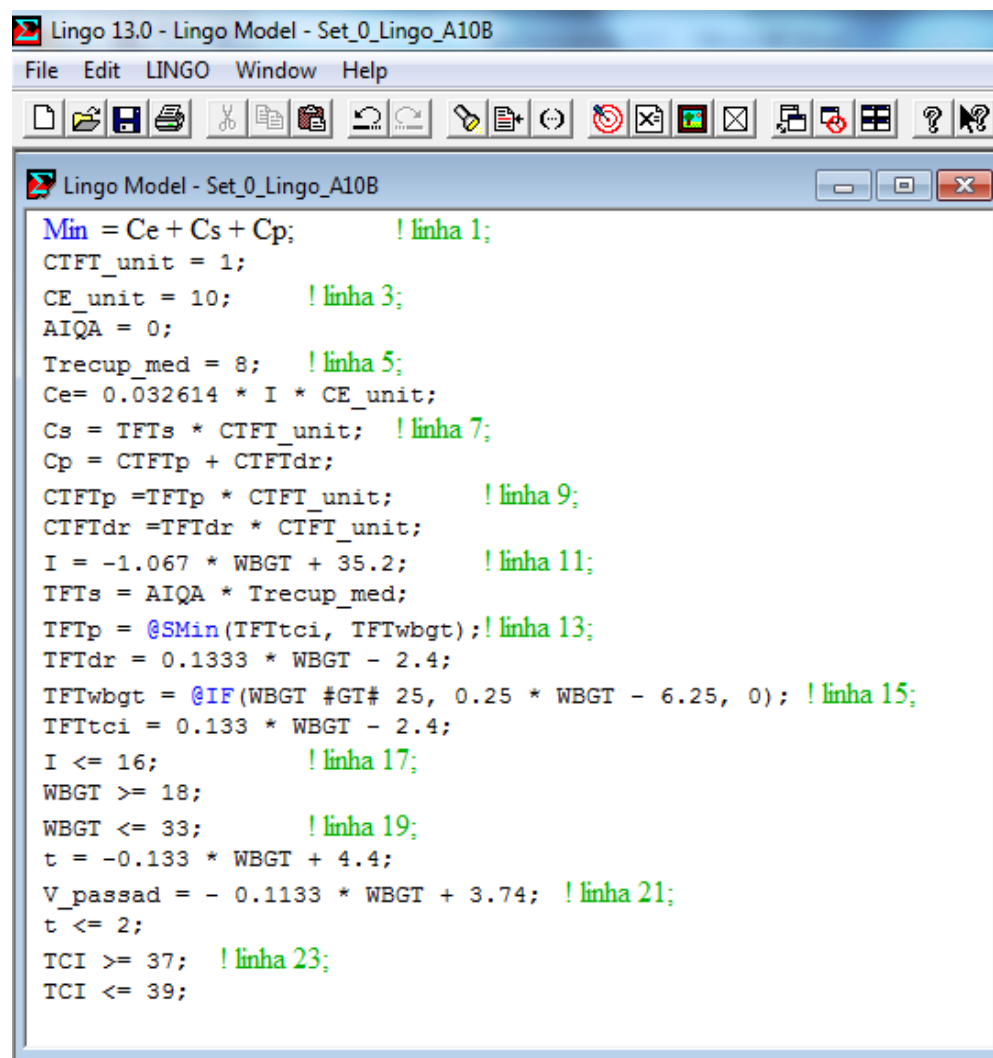
Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.000000
8	0.000000	INFINITY	1.997526
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	1.997526
11	35.20000	0.000000	0.000000
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	1.997526
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	16.00000
18	18.00000	14.98969	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	0.1030928E-01
20	4.400000	1.987629	0.1237113E-01
21	3.740000	INFINITY	0.2268041E-02
22	2.000000	INFINITY	1.987629
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

Resultados obtidos pelo *software Lingo* para o modelo *Set_0_T*, variante A10B

Modelo (Variante A10B):



```

Lingo 13.0 - Lingo Model - Set_0_Lingo_A10B
File Edit LINGO Window Help

Min = Ce + Cs + Cp;          ! linha 1;
CTFT_unit = 1;
CE_unit = 10;               ! linha 3;
AIQA = 0;
Trecup_med = 8;             ! linha 5;
Ce = 0.032614 * I * CE_unit;
Cs = TFTs * CTFT_unit;      ! linha 7;
Cp = CTFTp + CTFTdr;
CTFTp = TFTp * CTFT_unit;   ! linha 9;
CTFTdr = TFTdr * CTFT_unit;
I = -1.067 * WBGT + 35.2;   ! linha 11;
TFTs = AIQA * Trecup_med;
TFTp = @SMin(TFTtci, TFTwbgt); ! linha 13;
TFTdr = 0.1333 * WBGT - 2.4;
TFTwbgt = @IF(WBGT #GT# 25, 0.25 * WBGT - 6.25, 0); ! linha 15;
TFTtci = 0.133 * WBGT - 2.4;
I <= 16;                    ! linha 17;
WBGT >= 18;
WBGT <= 33;                 ! linha 19;
t = -0.133 * WBGT + 4.4;
V_passad = - 0.1133 * WBGT + 3.74; ! linha 21;
t <= 2;
TCI >= 37;                  ! linha 23;
TCI <= 39;

```

Solução (Variante A10B):

Lingo 13.0 - [Solution Report - Set_0_Lingo_A10B]																																																																													
File Edit LINGO Window Help																																																																													
Local optimal solution found.																																																																													
Objective value:	3.712843																																																																												
Infeasibilities:	0.2400000E-06																																																																												
Total solver iterations:	17																																																																												
Model Class:	NLP																																																																												
Total variables:	13																																																																												
Nonlinear variables:	3																																																																												
Integer variables:	0																																																																												
Total constraints:	18																																																																												
Nonlinear constraints:	2																																																																												
Total nonzeros:	32																																																																												
Nonlinear nonzeros:	3																																																																												
<table> <tr> <th>Variable</th><th>Value</th><th>Reduced Cost</th></tr> <tr><td>CE</td><td>2.780343</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CS</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CP</td><td>0.9325001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CTFT_UNIT</td><td>1.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CE_UNIT</td><td>10.00000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>AIQA</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TRECUP_MED</td><td>8.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>I</td><td>8.524999</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TFTS</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CTFTP</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>CTFTDR</td><td>0.9325001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TFTP</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TFTDR</td><td>0.9325001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>WBG</td><td>25.00000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TFTTCI</td><td>0.9250001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TFTWBG</td><td>0.000000</td><td>0.1412345</td></tr> <tr><td>T</td><td>1.075000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>V_PASSAD</td><td>0.9074999</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>TCI</td><td>39.00000</td><td>0.000000</td></tr> </table>			Variable	Value	Reduced Cost	CE	2.780343	0.000000	CS	0.000000	0.000000	CP	0.9325001	0.000000	CTFT_UNIT	1.000000	0.000000	CE_UNIT	10.00000	0.000000	AIQA	0.000000	0.000000	TRECUP_MED	8.000000	0.000000	I	8.524999	0.000000	TFTS	0.000000	0.000000	CTFTP	0.000000	0.000000	CTFTDR	0.9325001	0.000000	TFTP	0.000000	0.000000	TFTDR	0.9325001	0.000000	WBG	25.00000	0.000000	TFTTCI	0.9250001	0.000000	TFTWBG	0.000000	0.1412345	T	1.075000	0.000000	V_PASSAD	0.9074999	0.000000	TCI	39.00000	0.000000															
Variable	Value	Reduced Cost																																																																											
CE	2.780343	0.000000																																																																											
CS	0.000000	0.000000																																																																											
CP	0.9325001	0.000000																																																																											
CTFT_UNIT	1.000000	0.000000																																																																											
CE_UNIT	10.00000	0.000000																																																																											
AIQA	0.000000	0.000000																																																																											
TRECUP_MED	8.000000	0.000000																																																																											
I	8.524999	0.000000																																																																											
TFTS	0.000000	0.000000																																																																											
CTFTP	0.000000	0.000000																																																																											
CTFTDR	0.9325001	0.000000																																																																											
TFTP	0.000000	0.000000																																																																											
TFTDR	0.9325001	0.000000																																																																											
WBG	25.00000	0.000000																																																																											
TFTTCI	0.9250001	0.000000																																																																											
TFTWBG	0.000000	0.1412345																																																																											
T	1.075000	0.000000																																																																											
V_PASSAD	0.9074999	0.000000																																																																											
TCI	39.00000	0.000000																																																																											
<table> <tr> <th>Row</th><th>Slack or Surplus</th><th>Dual Price</th></tr> <tr><td>1</td><td>3.712843</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.000000</td><td>-0.9325001</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.000000</td><td>-0.2780343</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.000000</td><td>-8.000000</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.000000</td><td>-0.3261400</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.000000</td><td>-1.000000</td></tr> <tr><td>15</td><td>-0.2400000E-06</td><td>-0.8587655</td></tr> <tr><td>16</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>17</td><td>7.475001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>18</td><td>7.000001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>19</td><td>7.999999</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>21</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>22</td><td>0.9250001</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>23</td><td>2.000000</td><td>0.000000</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td></tr> </table>			Row	Slack or Surplus	Dual Price	1	3.712843	-1.000000	2	0.000000	-0.9325001	3	0.000000	-0.2780343	4	0.000000	-8.000000	5	0.000000	0.000000	6	0.000000	-1.000000	7	0.000000	-1.000000	8	0.000000	-1.000000	9	0.000000	-1.000000	10	0.000000	-1.000000	11	0.000000	-0.3261400	12	0.000000	-1.000000	13	0.000000	-1.000000	14	0.000000	-1.000000	15	-0.2400000E-06	-0.8587655	16	0.000000	0.000000	17	7.475001	0.000000	18	7.000001	0.000000	19	7.999999	0.000000	20	0.000000	0.000000	21	0.000000	0.000000	22	0.9250001	0.000000	23	2.000000	0.000000	24	0.000000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price																																																																											
1	3.712843	-1.000000																																																																											
2	0.000000	-0.9325001																																																																											
3	0.000000	-0.2780343																																																																											
4	0.000000	-8.000000																																																																											
5	0.000000	0.000000																																																																											
6	0.000000	-1.000000																																																																											
7	0.000000	-1.000000																																																																											
8	0.000000	-1.000000																																																																											
9	0.000000	-1.000000																																																																											
10	0.000000	-1.000000																																																																											
11	0.000000	-0.3261400																																																																											
12	0.000000	-1.000000																																																																											
13	0.000000	-1.000000																																																																											
14	0.000000	-1.000000																																																																											
15	-0.2400000E-06	-0.8587655																																																																											
16	0.000000	0.000000																																																																											
17	7.475001	0.000000																																																																											
18	7.000001	0.000000																																																																											
19	7.999999	0.000000																																																																											
20	0.000000	0.000000																																																																											
21	0.000000	0.000000																																																																											
22	0.9250001	0.000000																																																																											
23	2.000000	0.000000																																																																											
24	0.000000	0.000000																																																																											

Análise de sensibilidade (Variante A10B):

Lingo 13.0 - [Range Report - Set_0_Lingo_A10B]

File Edit LINGO Window Help

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
CE	1.000000	0.000000	0.000000
CP	1.000000	0.000000	0.000000
I	0.000000	0.000000	0.000000
CTFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
CTFTDR	0.000000	0.000000	0.000000
TFTP	0.000000	INFINITY	INFINITY
TFIDR	0.000000	0.000000	0.000000
WGBT	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTICI	NONLINEAR	0.000000	0.000000
TFTWGBT	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
T	0.000000	0.000000	0.000000
V_PASSAD	0.000000	0.000000	0.000000
TCI	0.000000	0.000000	INFINITY

Righthand Side Ranges:

Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
6	0.000000	INFINITY	0.000000
8	0.000000	INFINITY	1.997526
9	0.000000	INFINITY	0.000000
10	0.000000	INFINITY	1.997526
11	35.20000	0.000000	0.000000
13	NONLINEAR	INFINITY	0.000000
14	-2.400000	INFINITY	1.997526
15	NONLINEAR	0.000000	0.000000
16	-2.400000	0.000000	0.000000
17	16.00000	INFINITY	16.00000
18	18.00000	14.98969	INFINITY
19	33.00000	INFINITY	0.1030928E-01
20	4.400000	1.987629	0.1237113E-01
21	3.740000	INFINITY	0.2268041E-02
22	2.000000	INFINITY	1.987629
23	37.00000	2.000000	INFINITY
24	39.00000	INFINITY	2.000000

For Help, press F1

ANEXO 6.1

Resultados Koehn e Brown (1985) – *Table 6*, pg. 135

Koehn & Brown (1985): Table 6, pg. 135

Valores de Produtividade em atividades de construção civil
como função da temperatura e humidade relativa

		H _R (%)									
T °F	°C	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
-20	-29	0,28	0,27	0,25	0,22	0,18	0,13	0,05	-	-	-
-10	-23	0,44	0,43	0,42	0,4	0,38	0,34	0,29	0,21	0,1	-
0	-18	0,59	0,58	0,57	0,56	0,54	0,52	0,49	0,44	0,36	0,23
10	-12	0,71	0,71	0,7	0,7	0,69	0,67	0,65	0,62	0,58	0,5
20	-7	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,8	0,79	0,77	0,75	0,71
30	-1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87
40	4	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
50	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	27	1	1	1	1	1	0,99	0,98	0,96	0,95	0,93
90	32	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,9	0,88	0,85	0,82	0,78
100	38	0,81	0,81	0,8	0,79	0,77	0,74	0,71	0,67	0,61	0,54
110	43	0,58	0,58	0,58	0,57	0,55	0,51	0,47	0,41	0,32	0,21
120	49	-	0,28	0,28	0,28	0,25	0,21	0,15	0,07	-	-